

**BORLANMIŞ AISI M35 VE AISI M42  
ÇELİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU VE  
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Mehmet KÜÇÜKKURT

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN

METALURJİ VE MALZEME

MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs, 2015

Bu tez çalışması 13.FEN.BİL.55 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BORLANMIŞ AISI M35 VE AISI M42 ÇELİKLERİNİN**  
**KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ**  
**İNCELENMESİ**

**Mehmet KÜÇÜKKURT**

**DANIŞMAN**

**Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Mayıs, 2015**

## TEZ ONAY SAYFASI

Mehmet KÜÇÜKKURT tarafından hazırlanan “Borlanmış AISI M35 ve AISI M42 Çeliklerinin Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 17/05/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği **Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN

**Başkan** : Prof. Dr. Şükrü TAKTAK İmza  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi.

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN İmza  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi.

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Rıza KARA İmza  
Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu.

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
...../...../..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR

Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**17/11/2015**

**Mehmet KÜÇÜKKURT**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BORLANMIŞ AISI M35 VE AISI M42 ÇELİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mehmet KÜÇÜKKURT

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Halil AYTEKİN

Günümüzde, sürtünme ve aşınma problemleri için yeni malzemelerin geliştirilmesinin yanı sıra çeşitli yüzey işlemleri de oldukça geniş alanda kullanılmaktadır. Bir termokimyasal yüzey işlemi olan borlama işlemi, hem uygulanması kolay olduğu için hem de yüzey sertliğinin artırılması ile parçanın aşınma direncini arttırdığı için geniş bir alanda uygulanmaktadır. Özellikle yüksek hız takım çelikleri gibi sürtünmeli ortamlarda çalışan kesici takımların, mevcut üst yapıdaki aşınma direncini arttırmak amacıyla borlama işlemi yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında, AISI M35 ve AISI M42 yüksek hız-takım çelikleri kutu borlama işlemi ile borlanmış ve bu işlem sonucunda oluşan bor tabakaları incelenmiştir. Ayrıca tüm numuneler üzerinde aşınma deneyleri yapılmış ve borlama işlemi sonucu oluşan bor tabakalarının çeliklerin aşınma dirençlerine etkisi araştırılmıştır. Borlama işlemi 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda ve 2, 4, 6 saat süreler için gerçekleştirilmiş ve borlanan numunelerin XRD ve SEM analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda ana malzeme yüzeyinde çeşitli bor bileşiklerinin oluştuğu ve artan sıcaklık ve süreyle beraber oluşan bor kaplama tabakalarının kalınlıklarının da arttığı saptanmıştır. Bu artış, çeliklerin aşınma direncine olumlu yansımıştır. Ayrıca kaplamaların mikro sertlik değerleri de (yüzeyden matrise doğru) ölçülmüş ve elde edilen değerler aşınma verileri ile karşılaştırılmıştır.

**2015, xiv + 112 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Borlama, Sertlik, Aşınma Dayanımı, Yüksek Hız-Takım Çelikleri.

## **ABSTRACT**

M.Sc Thesis

### **CHARACTERIZATION OF THE BORONIZED AISI M35 & M42 STEELS AND INVESTIGATION OF THE WEAR BEHAVIOR**

Mehmet KÜÇÜKKURT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Halil AYTEKİN

Nowadays, the improving of the new materials as well as the various surface treatments are used in a wide area for the friction and wear problems. The boriding process that is a thermochemical surface treatment has been used in a wide area because of its ease, and it improves the wear resistance by increasing the surface hardness of a part. The boriding treatment may be conducted on the cutting tools (such as high speed tool steel) that work in abrasive environments for increasing the wear resistance. In this study, AISI M35 and M42 high speed steel borided with box-borinizing, and the boron layer that occurred as a result of this process was investigated. Additionally, wear tests were performed on all samples, and the effect of the boron layer on the wear resistance of the steel was investigated. Boriding process was performed for 850, 900, 950 °C and 2, 4, 6 hours, and XRD and SEM analysis of borided specimens were conducted. In the result of these analyzes, the various boron compounds on the surface of the base material occurred, and the coating layer thickness increased with the increasing the boriding time and temperature. This increase was reflected positively on the wear resistance of the steels. Additionally, the microhardness values of the coating layers (towards to the matrix from the surface) was measured, and the microhardness values obtained were compared with the wear data.

**2015, xiv + 112 pages**

**Key Words:** Boriding, Hardness, Wear Resistance, High-Speed-Tool Steels.

## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay tez danışmanım, araştırma ve yazım sresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Do. Dr. Halil AYTEKİN' e, her konuda neri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonunun, 13.FEN.BİL.55 numaralı tez projeme sağladıkları katkılarında dolay teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolay aileme teşekkür ederim.

Mehmet KÜÇÜKKURT  
AFYONKARAHİSAR, 2015

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ .....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	3
2.1 Bor .....	3
2.1.1 Borun Tarihçesi .....	4
2.1.2 Borun Yapısı.....	5
2.1.2.1 Kimyasal Yapısı.....	5
2.1.2.2 Fiziksel Yapısı .....	6
2.1.3 Bor Bileşikleri ve Borun Elde Edilişi .....	7
2.1.3.1 Saf Borun Elde Edilişi .....	7
2.1.3.2 Boraks ve Elde Ediliş Yöntemi.....	8
2.1.4 Borun Kullanım Alanları .....	10
2.2 Borlama.....	14
2.2.1 Borlama İşlemi .....	14
2.2.2 Borlama Yöntemleri .....	16
2.2.2.1 Katı Borlama.....	16
2.2.2.2 Pasta Borlama .....	19
2.2.2.3 Sıvı Borlama .....	19
2.2.2.4 Gaz Borlama .....	20
2.2.3 Bor Metal Bileşikleri ve Karakteristikleri .....	21
2.2.3.1 Bor Tabaklarının Sertlikleri .....	21
2.2.3.2 Borlanmış Düşük Alaşımli Çeliklerin Yüzey Morfolojisi .....	22
2.2.3.3 Borlanmış Yüksek Alaşımli Çelikleri Yüzey Morfolojisi .....	23
2.2.3.4 Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi .....	26



2.3 Yüksek Hız Çelikleri .....	28
2.3.1 Yüksek Hız Çeliklerinin M ve T Sınıfı .....	29
2.3.2 AISI M35 ve M42 Çeliklerinin Özellikleri ve Kullanım Alanları .....	30
2.4 Aşınma .....	30
2.4.1 Aşınma Mekanizmaları .....	32
2.4.2 Abrasif Aşınma .....	33
2.4.3 Adhesif Aşınma .....	35
2.4.4 Yorulma Aşınması .....	36
2.4.5 Eroziv Aşınma .....	36
2.4.6 Korozif Aşınma .....	38
2.4.7 Deneysel Aşınma Metodları .....	39
2.4.7.1 Pin On Flat Yöntemi .....	39
2.4.7.2 Pin On Disk Yöntemi .....	40
2.4.7.3 Pin On Drum Yöntemi .....	40
2.4.7.4 Ball On Disk Yöntemi .....	41
3. MATERYAL ve METOT .....	43
3.1 İncelenen Çelikler .....	43
3.2 Borlama İşlemi .....	44
3.3 XRD Analizi .....	46
3.4 Aşınma Deneyi .....	47
3.4.1 Profilometre ile Aşınma İzi Analizi .....	48
3.5 İç Yapı Analizleri .....	49
3.5.1 Metalografik İncelemeler .....	49
3.5.2 SEM ve EDX Analizleri .....	51
3.6 Mikro Sertlik Ölçümleri .....	52
4. BULGULAR .....	53
4.1 İncelenen Çeliklerin Karakterizasyonu .....	53
4.1.1 İçyapı Analizleri .....	53
4.1.2 XRD Analizi .....	79
4.1.3 Mikro Sertlik Analizi .....	85
4.2 Aşınma Testi .....	93
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	101
6. KAYNAKLAR .....	104
ÖZGEÇMİŞ .....	112

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

°A	Angström
°C	Santigrat derece
°F	Fahrenhayt derece
°K	Kelvin derece
μ	Sürtünme katsayısı
μm	Mikron
A	Amper
Al	Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
B	Bor
B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Diboran
BN	Bor nitrür
Br	Brom
C	Karbon
CaCO <sub>3</sub>	Kalsiyum karbonat
CaO.3B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Kolemanit
Cc	Hacim birimi
Cm	Santimetre
Co	Kobalt
Co <sub>2</sub> B	Kobalt borit
Co <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	Diborür trikobalt
Cr	Krom
Cr B <sub>2</sub>	Krom diborit
Cr B <sub>4</sub>	Krom tetraborat
Cr <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	Dikrom borit
CrB	Krom bor
Cu	Bakır
eV	Elektron Volt
Fe	Demir
Fe <sub>2</sub> B	Demir (II) bor bileşiği
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir III oksit
FeB	Demir (I) bor bileşiği
FeO	Demir II oksit
GPa	Giga Pascal
Gr	Gram
h, H	Saat
H <sub>2</sub>	Hidrojen (moleküler)
H <sub>2</sub> O	Su
HCl	Hidrojen klorür
He	Helyum
HF	Hidrojen florür
In	Inch (uzunluk birimi)
J	Joule
kg	Kilogram

---

## Simgeler (Devam)

---

kJ	Kilo joule
lb	Libre(ölçü birimi)
LiF	Lityum florür
M	Metre
mesh	Ölçü birimi
mg	Miligram
Mg <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	Magnezyum borit
MgO	Magnezyum oksit
mm	Milimetre
Mn	Mangan
Mo	Molibden
Mo <sub>2</sub> B	Molibden bor bileşiği
mol	Mol
Na	Sodyum
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O	Disodyum tetraboroksit
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Susuz boraks
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	Boraks dekahidrat
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .5H <sub>2</sub> O	Boraks pentahidrat
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Sodyum klorür
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	Kriyolit
NaBF <sub>4</sub>	Sodyum tetrafluoboratu
NaCl	Sodyum klorür
NaF	Sodyum florür
NaOH	Sodyum hidroksit
NH <sub>4</sub> Cl	Amonyak klorür
Pa	Paskal
rpm	Dakikadaki devir sayısı
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür bileşiği
Sn	Kalay
Ti	Titanyum
TiB <sub>2</sub>	Titanyum diborit
V	Volt
V	Vanadyum
W	Tungsten
W	Yük
W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	Tungsten-bor bileşiği
WC	Tungsten karbür
Zr	Zirkonyum
α-R	Rombohedral kafes
β-T	Tetragonal kafes
Γ	Ortorombik kafes

---

## Kısaltmalar

---

AISI	Amerikan demir çelik endüstrisi
ATM	Atmosfer(basınç birimi)
BE	Geri saçılmış elektron
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
DIN	Alman standartlar endüstrisi
E	Elastisite modülü
EC	Avrupa birliği
EDX	X-ray dağılım enerjisi
E-Glass	Cam elyafının ticari ismi
Ekabor II	Borlama işleminde kullanılan ticari bor bileşiği
HB	Brinell sertliği
HRC	Rockwell sertliği
HSS	High speed steel (yüksek hız çeliği)
HV	Vickers sertliği
INCO	Incoloy (demir-nikel alaşımı)
JIS	Japon standartlar endüstrisi
M <sub>x</sub> C	Metal karbür bileşikleri
N	Newton
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
QBSD	Geri saçılmış elektron detektörü
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TMMOB	Türk mühendis ve mimar odaları birliği
XRD	X-ray difraktometresi
XRF	X-ray floresan

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1 Tinkalden boraks üretimi akış şeması .....	10
Şekil 2.2 Düşük karbonlu St37 çeliğinin 900 °C’de borlanması sonucu FeB ve Fe <sub>2</sub> B yapılarının faz ayrımları .....	15
Şekil 2.3 Düşük karbonlu bir çelikte sıcaklık ve zaman değişimine göre oluşan bor tabakası kalınlığı .....	16
Şekil 2.4 Katı borlama kutusunun şemasını gösteren kesit. ....	17
Şekil 2.5 AISI 1080 düşük alaşımlı çeliğin borlanması ile elde edilmiş (a) 6 saat 1272 °K’de, (b) 8 saat 1272 °K’de testere diş yapısı .....	23
Şekil 2.6 AISI M2 çeliğine 1273 °K’de 6 saat süreyle uygulanmış borlama işlemi sonucu yüzey morfolojisinin SEM analizi .....	24
Şekil 2.7 AISI M2 çeliğinin 1273 °K’de 6 saat boyunca borlanması sonucu oluşan bor tabakasının XRD analizi .....	25
Şekil 2.8 Borlanmış AISI H13 çeliğinde dikey ve paralel çatlakların SEM analizi .....	26
Şekil 2.9 Alaşım elementlerinin bor tabakası kalınlığına etkisi .....	27
Şekil 2.10 Bor tabakası kalınlığının alaşım elementleri ile değişimi (a) karbon (C45 - %0.5C; C100 - %1.03C) ve krom (100Cr6 - %1.1C-1.6Cr; X40Cr13 - %0.35C -12.5Cr), (b) krom, tungsten, vanadyum ve molibden.....	28
Şekil 2.11 Gevrek ve sünek malzemelerde oluşan aşınma bölgeleri (a) sünek bir malzemenin (b) gevrek bir malzemenin sert bir cisimle aşındırılması .....	34
Şekil 2.12 Abrasif iki ve üç elemanlı aşınma şematığı .....	34
Şekil 2.13 Adhesif aşınma (a) kaymaya başlamadan önce yüzeylerin birbirine yapışması (b) kayma sonrası yüzeyde oluşan yapışmadan sonra meydana gelen plastik deformasyon sonucu malzeme kaybı .....	35
Şekil 2.14 Belirli bir çevrim altındaki bir yüzeyde meydana gelen çatlak oluşumları ..	36

Şekil 2.15 Erozif aşınma mekanizmaları.....	37
Şekil 2.16 Korozif bir malzeme ile aşınmış yüzey arasındaki etkileşimler .....	38
Şekil 2.17 Pin-on-flat aşındırma yönteminin şeması .....	39
Şekil 2.18 Pin-on-disk çalışma şeması.....	40
Şekil 2.19 Pin-on-drum çalışma şeması .....	41
Şekil 2.20 Ball on disk yönteminin çalışma şeması.....	41
Şekil 4.1 İncelenen çeliklerin içyapıları (a) AISI M35, (b) AISI M42. ....	53
Şekil 4.2 İncelenen çeliklerin SEM içyapıları (a) AISI M35, (b) AISI M42. ....	54
Şekil 4.3 AISI M35 çeliğinin EDX analizi. ....	55
Şekil 4.4 AISI M42 çeliğinin EDX analizi. ....	56
Şekil 4.5 850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h. ....	57
Şekil 4.6 900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h. ....	58
Şekil 4.7 950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h. ....	59
Şekil 4.8 850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h. ....	61
Şekil 4.9 900 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h .....	62
Şekil 4.10 950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h. ....	63
Şekil 4.11 850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.....	65

<b>Şekil 4.12</b> 900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.....	67
<b>Şekil 4.13</b> 950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.....	68
<b>Şekil 4.14</b> 850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.....	70
<b>Şekil 4.15</b> 900 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.....	71
<b>Şekil 4.16</b> 950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.....	73
<b>Şekil 4.17</b> İncelenen çeliklerinin tabaka kalınlıklarının sıcaklık ve süre ile değişimi (a) AISI M35, (b) AISI M42. ....	75
<b>Şekil 4.18</b> 950 °C’de 6 saat süreyle borlanmış AISI M42 çeliğinin SEM-EDX analizi (örnek).....	77
<b>Şekil 4.19</b> 850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin XRD grafiği.....	79
<b>Şekil 4.20</b> 900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin XRD grafiği.....	80
<b>Şekil 4.21</b> 950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin XRD grafiği.....	81
<b>Şekil 4.22</b> 850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin XRD grafiği. ....	82
<b>Şekil 4.23</b> 900 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin XRD grafiği. ....	83
<b>Şekil 4.24</b> 950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin XRD grafiği. ....	84
<b>Şekil 4.25</b> 900 °C’de 4 saat süreyle borlanmış çelik için mikro sertlik indentör izleri (a) AISI M35 ve (b) AISI M42 (örnek). ....	85
<b>Şekil 4.26</b> İncelenen çeliklerin bor tabakasının mikro sertlik değişim grafiği (a) AISI M35 ve (b) AISI M42 .....	92
<b>Şekil 4.27</b> İncelenen çeliklerin sürtünme katsayıları (a) AISI M35 ve (b) AISI M42 ...	93

<b>Şekil 4.28</b> Profilometre cihazından elde edilen numune yüzeyinin görüntüsü (örnek) AISI M35 (a) Ham, (b) 900-4h ve AISI M42 (c) Ham, (d) 900-4h.....	95
<b>Şekil 4.29</b> İncelenen çeliklerin aşınma izi hacimleri (a) AISI M35 ve (b) AISI M42 ...	96
<b>Şekil 4.30</b> Ham numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) AISI M35 ve (b) AISI M42. ....	97
<b>Şekil 4.31</b> 900 °C’de 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) AISI M35 ve (b) AISI M42 (örnek).....	98
<b>Şekil 4.32</b> İncelenen çeliklerin aşınma hızı (a) AISI M35 ve (b) AISI M42. ....	99



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Bor elementinin atomik yapısına ilişkin bazı veriler .....	3
Çizelge 2.2 Borun allotrop yapılarının özellikleri.....	5
Çizelge 2.3 Borun kimyasal özellikleri .....	6
Çizelge 2.4 Borun fiziksel özellikleri.....	6
Çizelge 2.5 Endüstriyel olarak kullanılan bor mineralleri .....	7
Çizelge 2.6 Borun endüstriyel kullanım alanları.....	13
Çizelge 2.7 Borun çeşitli alaşım elementleri ile oluşturduğu fazların sertlik değerleri ve ergime noktaları .....	22
Çizelge 2.8 Yüksek hız çeliklerinin kompozisyonlarına göre sınıflandırılması .....	29
Çizelge 3.1 İncelenen çeliklerin kimyasal bileşimleri.....	43
Çizelge 4.1 Borlanmış AISI M35 ve M42 çeliklerinin bor tabakası kalınlıkları. ....	74
Çizelge 4.2 850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin mikro sertlik değerleri. ....	86
Çizelge 4.3 900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin mikro sertlik değerleri. ....	87
Çizelge 4.4 950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin mikro sertlik değerleri. ....	88
Çizelge 4.5 850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin mikro sertlik değerleri .....	89
Çizelge 4.6 900 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin mikro sertlik değerleri. ....	90
Çizelge 4.7 950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin mikro sertlik değerleri. ....	91

## RESİMLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Resim 3.1</b> Hazırlanan numuneler.....	43
<b>Resim 3.2</b> Silindirik borlama kutusu.....	44
<b>Resim 3.3</b> Borlama işleminde kullanılan fırın.....	45
<b>Resim 3.4</b> Borlama işlemi öncesi ve sonrası numunelerin görünüşü.....	45
<b>Resim 3.5</b> Ultrasonik numune temizleme cihazı.....	46
<b>Resim 3.6</b> XRD cihazı (Brucker marka).....	47
<b>Resim 3.7</b> Aşınma cihazı.....	48
<b>Resim 3.8</b> Profilometre cihazı.....	48
<b>Resim 3.9</b> Hassas numune kesme cihazı.....	49
<b>Resim 3.10</b> Sıcak kalıplama cihazı.....	50
<b>Resim 3.11</b> Zımparalama ve parlatma cihazı (Gripo 2V marka).....	50
<b>Resim 3.12</b> Olympus optik mikroskop.....	51
<b>Resim 3.13</b> SEM ve EDX analiz cihazı.....	52
<b>Resim 3.14</b> Mikro sertlik cihazı.....	52

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda makine ve malzeme biliminin gelişimine paralel olarak özellikle sürtünme ile aşınma problemleri yeni ihtiyaçları doğurmuştur. Bu ihtiyaçların giderilmesinde yeni malzemelerin kullanılmasının yanı sıra çeşitli yüzey işlemleri de popülerliğini artırmıştır (EC 2014). Özellikle termokimyasal yüzey işlemleri gerek uygulanabilirlik gerekse maliyet açısından tercih edilebilirlik sergilemektedir (Czerwinski 2012). Termokimyasal yüzey işlemleri ile metal malzemelere ekstra mekanik ve fiziksel özellikler kazandırılabilir (Mittemeijer 2010). Bu özelliklerin başında sertlik, aşınma dayanımı ve yüksek sıcaklık sertliği gibi özellikler gelir (İnt.Kyn.1, İnt.Kyn.2).

Ülkemiz bor rezervleri bakımından dünyanın en önemli bor rezervine sahiptir (Önal ve Burat 2008, USGS 2014). Ülkemiz bor elementine ulaşılabilirlik açısından avantajlı bir konuma sahip olmasına rağmen ne yazık ki endüstriyel kullanımı sınırlı haldedir (İnt.Kyn.1). Borlama işlemi, yüksek sıcaklıkla yüzey sertleştirme işlemleri arasında popülerliğini gittikçe artırmaktadır (Davis 1997). Bunun sebebi diğer termokimyasal yüzey işlemlerine nazaran çok daha iyi aşınma katsayısı ve sertlik değerleri kazandırmasıdır (Arus *et al.* 2013). Ayrıca korozyon ve oksidasyon dirençleri gibi kazanımlar da elde edilebilir (Ohji *et al.* 2014). Bu tür kazanımların yanı sıra uygulama kolaylığı ve maliyetin düşük olması da hiç şüphesiz yöntemin kullanılmasını teşvik etmektedir (Petrova *et al.* 2011).

Borlama işlemiyle metal yüzeyinde oluşan demir bor bileşikleri (FeB, Fe<sub>2</sub>B ve CoB) malzemenin sertliğini artırarak sürtünme katsayısını azaltır ve buna paralel olarak malzemenin aşınmaya karşı direncini de artırır (Kulka *et al.* 2006, Galvanetto *et al.* 2006, Bejar *et al.* 2006, Bindal *et al.* 2008, Morimoto *et al.* 2009, Kayalı *et al.* 2011 ve Bataev *et al.* 2012).

Bor bileşiklerinin birçok metal malzemeye uygulanabilmesi yöntemin diğer bir avantajı olarak görülmektedir. Özellikle demir esaslı metallerin yanı sıra, demir dışı metallere de uygulanması yöntemin kullanım alanını genişletmektedir (Zimmerman 2013). Sürtünmenin yüksek olduğu makine elemanlarında bor kaplama kullanılarak sürtünme esnasında meydana gelen hasar azaltılabilir (Samadi and Habibolahzad 2010). Özellikle

yüksek hız takım çelikleri gibi sürtünme ortamlarında çalışan kesici takımların, mevcut yapısındaki aşınma ve sıcak sertlik gibi özellikleri daha yüksek noktalara getirebilmek amacıyla borlama işlemi yapılabilir (Özbek 2014). Böylelikle bu tür kesme elemanlarının mevcut ömrü de uzatılabilir. Ayrıca kritik özellikteki makine elemanlarına da borlama işlemi uygulanabilir (Muhammad 2013).

Borlama işlemi genellikle 800 - 1200 °C gibi yüksek sıcaklıklarda 8-10 saate kadar yapılabilmektedir (Tikekar 2007). Çeliklerde uygulama sıcaklığı ise genellikle 850 – 1000 °C sıcaklıklarda, 2-8 saat zaman aralıkları tercih edilmektedir. Uygulama sıcaklığının belirlenmesinde, genel olarak yapıda kalıcı faz dönüşümlerinin başladığı sıcaklığın altı tercih edilir (Fellner and Chrenkova 1991). İşlem metodu olarak çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bunlar başlıca katı borlama, sıvı borlama, gaz borlama, gibi yöntemlerdir (Asthana *et al.* 2006).

Yapmış olduğumuz çalışmada AISI M35 ve M42 yüksek hız-takım çeliklerine ticari Ekabor II tozu kullanılarak, kutu borlama yöntemiyle sırasıyla 850, 900 ve 950 °C de, 4 ve 6 saat borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama işleminin ardından bu çeliklerin referans numuneleri ile borlanmış numuneleri, sabit bir yük altında aşınma işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan XRD analizi ile oluşan bor fazları hakkında detaylı bilgi edinilmiştir. Aşınma sonucu oluşan izler SEM’de (taramalı elektron mikroskobu) incelenmesinin ardından profilometre ile aşınma izinin derinlik, genişlik ve hacmi hakkında bilgi edinilmiştir. Ardından bor kaplanmış numuneler metalografik olarak hazırlanıp kaplama tabakaları SEM ve optik mikroskopta incelenmiştir. Devamında mikro sertlik yöntemiyle kaplama tabakasından ana malzemeye (matrise) doğru sertlik ölçümleri yapılmıştır. Tüm sonuçlar için her iki molibden bazlı çelik birbiri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Bor

Bor atom ağırlığı 5 ve kimyasal simgesi B olan bir elementtir. Bor periyodik cetvelin 3A grubunda yer alan bir yarı-metaldir. Kozmik ışınlar ve yıldızlardaki nükleosentezle oluşan bor, yer kabuğunda ve güneş siteminde çok az miktarda bulunur (İnt.Kyn.3). Saf ya da element olarak doğada bulunmayan bor, mineral ya da bileşik halindedir. Kimyasal ağırlığı 10,81 olan bor elementinin elektron konfigürasyonu  $2s^2 2p^1$  ile biter (İnt.Kyn.4). Oda sıcaklığında katı halde ve koyu kahverengi görünen borun, erime noktası sıcaklığı  $2076\text{ }^\circ\text{C}$  ve kaynama noktası sıcaklığı  $3927\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Periyodik cetvelin P bloğu elementi olan bor, doğada tuz bileşikleri şeklinde bulunur. Bor kristali  $2,33\text{ g/cm}^{-3}$  yoğunluklu ve Amorf  $2,3\text{ g/cm}^{-3}$  yoğunluklu olarak doğada bulunur (Taşçı 1993). Borun atom yapısına ait veriler çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Amorf bor siyah veya kahverengi toz şeklinde, kristal bor ise sert ve kırılmandır. Bor kristali elmastan sonra en sert element yapısıdır. Elektrik akımını çok az iletir. Amorf bor havada ısıtıldığında  $700\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tutuşur ve  $\text{B}_2\text{O}_3$  oluşur. Isıyla Br, S,  $\text{Cl}_2$  ile birleşerek  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{BBr}_3$  ve  $\text{B}_2\text{S}_3$  bileşiklerini oluşturur. Bor  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'den sonra azotla bornitrit bileşiğini oluşturur (Sarız ve Nuhuğlu 1992).

**Çizelge 2.1** Bor elementinin atomik yapısına ilişkin bazı veriler (İnt.Kyn.5).

<b>Atomik Yapısı</b>	
Atomik Çapı	1.17 Å
Atomik Hacmi	4.6 $\text{cm}^3/\text{mol}$
Kristal yapısı	Rombohedral
Elektron Konfigürasyonu	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>
İyonik Çapı	0.23 Å
Elektron Sayısı (yüksüz)	5
Nötron Sayısı	6
Proton sayısı	5
Valans Elektronları	2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>

Kimyasal yapısı bakımından ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve HCl-HF asitleri ile soy davranış göstermektedir. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek, boroksit ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), aynı koşullarda nitrojen

ile bornitrit (BN), bazı metallerle magnezyum borit ( $Mg_3B_2$ ) ve titanyum diborit ( $TiB_2$ ) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşturmaktadır (Sarız ve Nuhoğlu 1992).

### 2.1.1 Borun Tarihçesi

Milattan Önce 2000 yıllara uzanan borun keşfi Babillere kadar uzanmaktadır. Babiller, boraks mineralini altın işletmeciliğinde kullanmışlardır. Daha sonra Mısırlılar; mumyalama, tıp ve metalürji uygulamalarında da kullanmışlardır. İlk boraks kaynağı, Tibet gölü ve çevresi olarak bilinmektedir. Yakın geçmişte 1700'lü yıllarda borakstan borik asit elde edilmiş ve takibindeki yüzyılda ise ilk element haldeki bor elde edilmiştir (Hildebrand 1982).

Bor elementini 1808 yılında Fransız kimyacı Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyacı Sir Humpry Davy tarafından bulunmuştur (Gay Lussac and Thenard 1808). Bor endüstrisinin geçmişı, 13. yüzyılda Marco Polo'nun Tibet'ten Avrupa'ya bor mineralleri getirmesiyle başlamıştır. Sıcak su kaynaklarında bulunan bor minerali Sasolit (borik asit ürünü) 1771 yılında İtalya'da keşfedilmiştir (Garrett 1998 ve İnt.Kyn.6). İlk boraks madenciliği ise Şili'de 1852 yılında başlamıştır. ABD yakın geçmişte Nevada, California, Caliko Mountain ve Kramer yöresindeki bor yataklarını keşfedip işletmesiyle beraber dünya bor ihtiyacını karşılayan birinci ülke olmayı başarmıştır. Ülkemizin geçmişine bakıldığında ise ilk işletme 1865 yılında bir Fransız şirketine imtiyaz verilerek başladığı görülmüştür (İnt.Kyn.7).

Bilindiği üzere Türkiye bor rezervi bakımından dünyada birinci sırada yer almaktadır. Ülkemizde, mevcut dünya rezervlerinin %72'si bulunmaktadır. Ülkemizden sonra ABD, dünya bor rezervlerinin %7'sine sahiptir (İnt.Kyn.8). ABD'yi ise Şili, Rusya gibi ülkeler takip etmektedir. Ülkemizde 1950 yılında Bigadiç ve 1952 yılında Mustafa Kemal Paşa yöresinde, kolemanit yatakları bulunmuştur. 1956 yılında Kütahya Emet kolemanit, 1961 yılında Eskişehir Kırka boraks yataklarının bulunması ve işletilmeye başlatılmasıyla Türkiye, dünya bor üretimi içinde %3 olan payını 1962'de %15, 1977'de %39 düzeyine yükseltmiştir. Türkiye'de bilinen başlıca bor yatakları Batı Anadolu'da yer almakta ve bu yataklar dünya rezervinin %60-70'ine sahip

bulunmaktadır. Türkiye rezervlerinin % 37'si Bigadiç, % 34'ü Emet, % 28 'i Kırka ve %1'i Köstelek bölgesinde bulunmaktadır. Bigadiç işletmesinde başlıca borat mineralleri kolemanit ve uleksittir. Boratlar 1-8 metre kalınlıkta tabakalar halinde, killer arasında yer alırlar. Kapalı ve açık ocaklardan üretilen tüvanan cevherleri, yılda 600000 ton cevher yıkama kapasiteli konsantratörlerde zenginleştirilerek, 25-125 mm, 3-25 mm kolemanit konsantreleri ile 3-125 mm ve 0,2-3 mm uleksit konsantreleri elde edilir. Bor mineral ve bileşiklerinin ülkemiz sınırlarında kullanımı çok kısıtlıdır. Kırka(Eskişehir) ve Bandırma(Balıkesir)'da yer alan tesislerde bor cevherleri rafine ürüne dönüştürülmektedir (İnt.Kyn.9). Ülkemiz bor rezervleri bakımından dünyanın en büyük rezervine sahip olmasına rağmen, bor işleme ve üretmede ABD ve Rusya gibi ülkelerin gerisindedir (İnt.Kyn.10). Maliyeti açısından bakıldığında elementer kristal bor, gramı 5 dolar iken amorf borun gramı 2 dolar mal olabilmektedir (İnt.Kyn.11). 1996 yılında yapılan bir araştırmada borun 230'dan fazla doğal mineral çeşidine sahip olduğu tespit edilmiştir (Garret 1998).

### 2.1.2 Borun Yapısı

Borun 3 adet valans elektronu vardır. Borun afinitesinin yüksek olmasından dolayı havadaki serbest oksijenle bortrioksit ( $B_2O_3$ ) oluşturur (İnt.Kyn.12). Bu sayede karbona benzeyen kararlı kovalent bağ yapısı kurabilirler. Çizelge 2.2'den de görüldüğü üzere borun geniş ölçekli 4 çeşit allotropu vardır ve maddesel halini(katı, sıvı, gaz) değiştirmeksizin çok farklı yapılara dönüşebilir (Delaplane *et al.* 1988).

**Çizelge 2.2** Borun allotrop yapılarının özellikleri (İnt.Kyn.12).

Allotropları	$\alpha$ -R	$\beta$ -R	$\gamma$	$\beta$ -T
Kafes yapıları	Rombohedral	Rombohedral	Ortarombik	Tetragonal
Atomlar	12	~105	28	
Yoğunluk ( $g/cm^3$ )	2.46	2,35	2.52	2.36
Vickers sertlikleri (Gpa)	42	45	50-58	
Basma gerilimi (GPa)	185	224	227	
Enerji bandı (eV)	2	1,6	2,1	

#### 2.1.2.1 Kimyasal Yapısı

Bor elementinin kimyasal özellikleri, morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır.

Çizelge 2.3’de borun kimyasal verileri gösterilmiştir. Mikron( $\mu\text{m}$ ) ebadındaki amorf bor, kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken kristal bor, kolay reaksiyon vermez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve bazı diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlayıcı olabilir ancak ana ürün olarak borik asit oluşur (İnt.Kyn.5).

**Çizelge 2.3** Borun kimyasal özellikleri (İnt.Kyn.12).

**Kimyasal Özellikleri**

Elektrokimyasal Eşdeğer	0.1344 g/amp-hr		
Elektronegativite (Pauling)	2.04		
Füzyon Isısı	50.2 kJ/mol		
İyonizasyon potansiyeli	Birinci:	İkinci:	Üçüncü: 37.93
Valans elektron potansiyeli (-eV)	190		

**2.1.2.2 Fiziksel Yapısı**

Proton ve elektron sayısı 5, nötron sayısı 6 ve atom çapı 1,78  $^{\circ}\text{A}$  olan borun nükleon sayısı başına bağlanma enerjisi mega elektron volt cinsinden 6,9’dur. Ayrıca temel fiziksel özellikleri çizelge 2.4’ de gösterilmiştir (Çalık 2002).

**Çizelge 2.4** Borun fiziksel özellikleri (İnt.Kyn.12).

**Fiziksel Özellikleri**

Atomik Kütle	10,811	
Kaynama Noktası	4275 K - 4002 $^{\circ}\text{C}$ - 7236 $^{\circ}\text{F}$	
Termal Genleşme	0.0000083 cm/ $^{\circ}\text{C}$ (0 $^{\circ}\text{C}$ )	
Kondüktivite	Elektriksel: 1.0E -12 106/cm	Termal: 0.274 W/cmK
Yoğunluk:	2.34 g/cc - 300 $^{\circ}\text{K}$	
Görünüş	Sarı-kahverengi ametal kristal	
Elastik Modülü	Bulk: 320/GPa	
Atomizasyon Entalpisi	573,2 kJ/mole - 25 $^{\circ}\text{C}$	
Füzyon Entalpisi	22,18 kJ/mole	
Buharlaştırma Entalpisi	480 kJ/mole	
Sertlik	Mohs: 9,3	Vickers: 49000 MN/m $^{-2}$
Buharlaştırma Isısı	489.7kJ/mol	
Ergime Noktası	2573 $^{\circ}\text{K}$ - 2300 $^{\circ}\text{C}$ - 4172 $^{\circ}\text{F}$	
Molar Hacmi	4,68 cm $^3$ /mole	
Fiziksel Durumu	(20 $^{\circ}\text{C}$ - 1 atm): Katı	
Spesifik Isısı	1,02 J/gK	
Buhar Basıncı	0,348 Pa - 2300 $^{\circ}\text{C}$	



### 2.1.3 Bor Bileşikleri ve Borun Elde Edilişi

Bor doğada saf halde bulunmaz, bileşik ya da mineral yapıdadır. Mineral yapıda yüzlerce çeşidi olan bor, doğada birden fazla elementin bileşiği şeklinde bulunur. Çizelge 2.5’de temel mineral yapıları gösterilmiştir. Bu yapılardan, elementer borun elde edilebilmesi için kimyasal reaksiyonlarla indirgenmesi gerekmektedir (Taşçıoğlu 1992).

**Çizelge 2.5** Endüstriyel olarak kullanılan bor mineralleri (Taşçıoğlu, 1992).

Mineralin Adı	Formülü	%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Tinkal(Ham Boraks)	Na <sub>2</sub> O.2B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	36,6
Tinkalkonit	Na <sub>2</sub> O.2B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .5H <sub>2</sub> O	47,8
Kernit	Na <sub>2</sub> O.2B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .4H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .4H <sub>2</sub> O	51,0
Uleksit	Na <sub>2</sub> O.2CaO.5B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .16H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> B <sub>10</sub> O <sub>18</sub> .16H <sub>2</sub> O	43,0
Kolemanit	2CaO.3B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O	Ca <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .5H <sub>2</sub> O	50,9
Mcyerhofferit	2CaO.3B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .7H <sub>2</sub> O	Ca <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .7H <sub>2</sub> O	46,7
Inyoit	2CaO.3B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .13H <sub>2</sub> O	Ca <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .13H <sub>2</sub> O	37,6
Pandermit	4CaO.5B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .7H <sub>2</sub> O	Ca <sub>4</sub> B <sub>10</sub> O <sub>19</sub> .7H <sub>2</sub> O	50,0
Kurnakovit	2MgO.3B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .15H <sub>2</sub> O	Mg <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .15H <sub>2</sub> O	37,3
Borasit (Stasfurit)	6MgO.MgCl <sub>2</sub> .8B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2Mg <sub>3</sub> B <sub>8</sub> O <sub>15</sub> MgCl <sub>2</sub>	62,6
Datolit	CaBSiO <sub>4</sub> (OH)		21,8
Sasolit(Doğal Borik Asit)	B (OH) <sub>3</sub>		56,3

#### 2.1.3.1 Saf Borun Elde Edilişi

B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşiğini potasyum ile indirgeyerek saf bor elde edilir. Bu yöntem ilk defa Guy-Lussac ve arkadaşları tarafından uygulanmıştır. Elektrolizle metalik bor, Davy tarafından elde edilmiştir. İlk %100 saflığa yakın bor ise Weintraub tarafından 1909 yılında, iki bakır elektrot arasında oluşturulan bir elektrik arkından BCl<sub>3</sub> geçirirken H<sub>2</sub> ile indirgeyerek %99,8 saflıkta bor elde edilmiştir (Taşçıoğlu 1992).

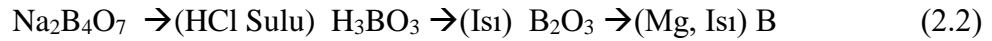


1930 yılında Van Arkel tarafından BBr<sub>3</sub>, ısıtılmış volfram teli üzerinde 1300 °C’de hidrojen akımından ayrıştırılarak siyah kristalize saf bor elde edilmiştir. Bor kristal halinde, bor hidrür ve bor triklorür karışımının ısıtılmış volfram-tantal alaşımı veya titanyum bir tel üzerinden geçirilmesiyle de elde edilebilir (Taşçıoğlu 1992).

Saf borun endüstriyel çaptaki üretimi için Hugh S. Cooper tarafından iki yöntem geliştirilmiştir. İlk yöntemde  $KBF_4$ , erimiş potasyum klorür banyosu içinde elektroliz edilir. Anot kutbuna grafitten yapılmış eritme potası, katot tarafına ise düşük karbonlu demir plaka takılır. Potadaki grafitin ayrışmasını engellemek için su ile soğutma yapılır. Akım şiddeti 3000 A, 6-12 V gerilim ve akım verimi %75 olacak şekilde ayarlanır. Klor anotta toplanır. Potasyum, tetrafluoboratu indirgeyerek bora dönüştürür. Böylelikle katot tarafında bor toplanır. Elde edilen yapı kaba kristalli bir görünümündedir. İçeriği %99.41 bor %0,3 karbon ve %0,20 demirden oluşur (Taşçıoğlu 1992).

İkinci yöntemde ise erimiş haldeki  $KBF_4$  ve  $B_2O_3$  karışımı elektroliz edilir. Anottan oksijen çıkar ve karbonla birleşir. Elde edilen ürünün kristal yapısı incedir ve 44 mikronluk elekten geçebilir. Elde edilen bileşim % 99.7 B, % 0.05 C, % 0.15 Fe içerir (Taşçıoğlu 1992).

Ayrıca  $KBF_4 + 3 Na \rightarrow KF + 3 NaF + B$  denkleminde göre de elde edilebilir. Amorf bor  $B_2O_3$ 'ün Mg ile indirgenmesiyle ( $B_2O_3 + 3Mg \rightarrow B + 3MgO$ ) elde edilebilir. Bu işlem borakstan başlayarak şöyle devam eder (Taşçıoğlu 1992).

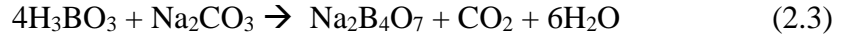


### 2.1.3.2 Boraks ve Elde Ediliş Yöntemi

Boraks olarak bilinen sodyum borat, disodyum borat ve sodyum tetraborat gibi yapılar borun oksijen asidinin tuzudur. Yoğunluğu  $1,73 \text{ gr/cm}^3$  olan boraks suda ve gliserinde çözünür, alkolde çözünmez. Erime noktası  $75^\circ\text{C}$  ve kaynama noktası  $200^\circ\text{C}$  olan boraksın metalere afinitesi yüksektir. Renksiz, saydam ve sudaki çözeltisi bazik reaksiyon gösteren bir tuzdur. Doğada, tinkal ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ) ve Tinkalkonit ( $Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$ ) minerali şeklinde bulunduğu gibi, bazı boratlardan da elde edilebilir. 10 Mol su içeren türü prizmatik kristaller, 5 mol su içeren türü oktaedrik kristaller şeklindedir. Susuz boraks kristalleri, boraks'ın  $320-400^\circ\text{C}$ 'de ısıtılması ile elde edilir. Bu amaçla ham veya rafine boraks dekahidrat kalsine edildikten sonra eritme fırınında eritilmektedir. Ürün ham susuz boraks ya da rafine susuz boraks şeklinde olmaktadır.

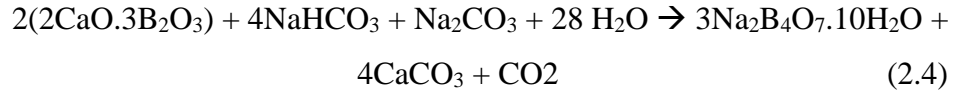
Boraksın dünyada en çok bulunduğu yer Eskişehir'dir. Boraksın üretimi 4 yöntemle yapılabilir (Taşçıoğlu 1992);

- 1- İlk yöntemde borik asidin sodyum karbonat ile reaksiyonundan elde edilir.



Boraks çözeltisi 60 °C'nin üzerinde ise boraks pentahidrat (5H<sub>2</sub>O), daha düşük sıcaklıklarda ise boraks dekahidrat (10H<sub>2</sub>O) kristallenir. Dekahidrat kolay su kaybettiğinden korunması pentahidrattan daha zordur (Taşçıoğlu, 1992).

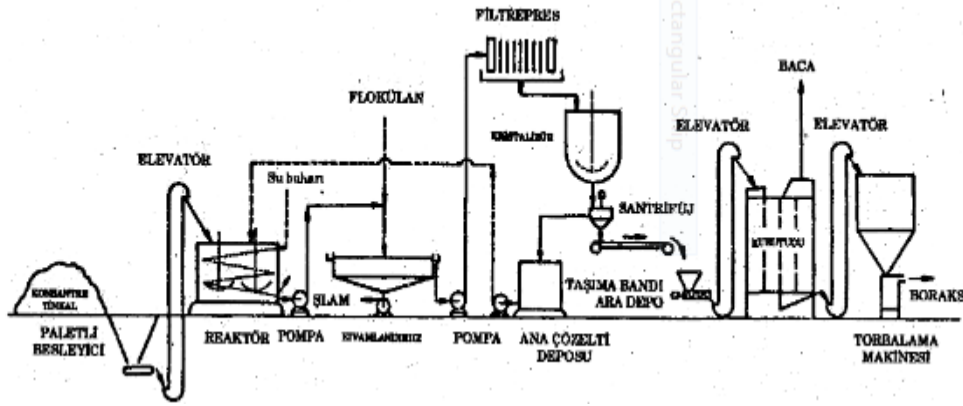
- 2- Kolemanit'ten boraks üretimi; öğütülmüş kalsine kolemanit, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve NaHCO<sub>3</sub> ile reaksiyona sokulur. Oluşan CaCO<sub>3</sub> çamuru süzülerek, ana çözelti kristallendirilir (Taşçıoğlu, 1992).



- 3- Tinkalden boraks üretimi (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>.10H<sub>2</sub>O), ham boraks haldeki cevher beraberinde bulunan kilden, çok az miktarda bir çöktürücü kullanılarak, kurtarılmaktadır. Maliyet açısından kolemanitten başlayarak yapılan üretimden daha az masraflıdır. Üretim kesintili olarak yapılmaktadır (Şekil 2.1). Bir evvelki işlemde santrifüjde boraks kristallerinden ayrılan boraks ana çözeltisi, endirekt olarak su buharı ile ısıtılan, çift karıştırıcılı iki reaktöre alınır. Yaklaşık 10 mm tanecikli yoğunlaştırılmış Tinkal, paletli besleyici ve elevatörle reaktöre yüklenir. 95-100°C sıcaklıkta ve karıştırarak çözündürülür. Tinkal ve beraberindeki kil, çözeltide koloidal haldedir. Çöktürebilmek amacıyla, ana çözeltinin on binde birkaç oranında floküle edici iyonik olmayan bir çözelti katılır. Kil birkaç dakikada çöker. Dipteki killi çözelti kısmı reaktörün altından alınır ve kısmen berrak olan üstteki çözelti filtre presten geçirilerek kristalizöre gönderilir. Kristallendiricide oluşan magma, santrifüje verilerek kristaller ana çözeltiden ayrılır. Bu ana çözelti su buharı ile ısıtılan depolara gönderilir. Santrifüjden alınan %5 nemli Boraks dekahidrat kristalleri bir ara depoya ve oradan da elevatörle kurutuculara verilerek, 60°C'ı aşmayan sıcaklıkta

kurutularak depolanır ve torbalanır. Kristal boraks dekahidrat(BDH) %99,5 saflıktadır (Taşçıoğlu 1992).

- 4- Boraks dekahidrat ayrıca kernit, uleksit, pandemit veya boraks içeren göl sularından da elde edilmektedir. Senelik 55000 ton/yıl kapasiteli, Etibank Bandırma fabrikası tinkal'den boraks üretimi akış şeması Şekil 2.1'de gösterilmektedir (Taşçıoğlu 1992).



Şekil 2.1 Tinkalden boraks üretimi akış şeması (Taşçıoğlu 1992).

#### 2.1.4 Borun Kullanım Alanları

Borun cam endüstrisinde çok yaygın kullanım alanı vardır. Özellikle borosilikat camlar içerdikleri bortriksit ve silis bazlı malzemeler ile genişleme katsayısı oldukça düşük olmasından kaynaklanan termal şoklara karşı direnç özelliği sayesinde çok fazla kullanım alanına sahiptir. Alman Otto Schot tarafından geliştirilen borosilikat camlar daha çok optik, lamba yapımı, elektronik ve sağlık alanlarında kullanımını artırmaktadır (Vogel 1994). Ayrıca laboratuvar camları, uçak camları, Pyrex, optik lifler, cam seramikler, tekstil cam elyafı, izole cam elyafı, otomotiv camları gibi pek çok alanda da kullanılmaktadır (Lyday 1996). Cam elyafları başta inşaat sektöründe yalıtım malzemesi olmak üzere pek çok alanda yalıtım sağlayıcı olarak kullanılır. Yalıtım cam elyafı üretiminde boraks pentahidrat da kullanılabilir. Kazan ve boru yalıtımlarının yanı sıra otomotiv sektöründe ses yalıtımı içinde kullanılmaktadır. Bir diğer cam elyafı türü ise tekstil cam elyafıdır. Bu malzeme yüksek mukavemet, korozyon dayanımının yanı sıra, gerilme ve darbelere dayanım gibi özelliklere sahip olmasından dolayı başta uçak, E-Glass, otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır (Lyday 1996 ve Roskill 1999).

Bor mineralleri seramik endüstrisinde emaye, seramik sırrı ve porselen yapımında kullanılmaktadır. Emaye sektöründe kullanımı borik asit, sır tabakasının daha düşük sıcaklıkta kaplanması ve yapışmasını sağlar. Bor mineralleri emaye fritlerinde kullanılırlar. Fritleştirme, sır hammaddelerinin eritilerek suda çözünmeyen inert bir cama dönüştürülmesi işlemidir. Emaye fritleri beyaz eşyaların alt kısımlarındaki korozyonu önlemek ve dekoratif bir görünüm kazandırılmak amacıyla uygulanır (Roskill 1999). Boratlar ayrıca seramik yapılarda yüzey gerilimini ve viskoziteyi düşürür ayrıca mekanik dayanımı ve çizilmeler karşı dayanımın artması da metodun avantajları arasındadır (Stefanov and Batschwarow 1988).

Deterjan sanayisindeki en önemli ağartıcılardan biriside sodyum, perborat bileşimidir. Sodyum perborat ağartıcı özelliğinden dolayı deterjan endüstrisinin vazgeçilmezidir. Suyun yüzey gerilimini düşürerek, temizlenmesi gereken yapıya nüfuziyeti artırır. Böylelikle yağ gibi çözünmesi güç maddeleri ortamdan uzaklaştırır. Ayrıca anti bakteriyel özelliğe de sahiptir (Roskill 1999).

Nükleer santrallerin soğutma havuzlarında ve çeşitli kontrol sistemlerinde bor içeren yapılar kullanılmaktadır. Nükleer reaktörlerde nötron yakalamak için bor kalkanları kullanılır (Martin 2008). Nükleer reaktörlerde kullanılan çubuklarda yüksek dayanım ve ergime noktası yüksek malzeme gereksinimine ihtiyaç duyulur. Bunun için kullanılan kadmiyum çubuk bu gereksinimi karşılamasına rağmen, yoğunluğunun çok fazla olması dezavantaj sağlamasından dolayı bor çubuklar kullanılmaktadır. Borun zayıf gama ışına radyasyonundan dolayı da tercih edilebilirliği yüksektir. Emniyet çubuklarında kullanılan B10 atomları nötron absorbe ederek Li ve He gazı neşreder. Bunun yanında nötron izolatörü olarak da kullanılır (Çeçen 1968).

Metalürji alanında borun kullanımı, cüruf yapıcı (flaks) ve akışkan özelliği ön planda tutularak başlamıştır. Malzemenin ergime sıcaklıklarını aşağılara çekmesi ve akışkanlığı sağlamasından dolayı kullanım alanı demir dışı metallere kadar uzanabilmektedir. Cüruf yapıcı uygulanmalarının yanı sıra, altın ve bakır gibi elementlerin rafinasyon işlemlerinde de bor kullanılır. Ayrıca çeliğin lehim kaynağında ve gaz lehimlemelerinde de kullanılır (Lyday 1996). Döküm sanayisinde özellikle demir esaslı yapıların

içerisinde bor miktarı çok azdır. Bunun temel nedeni alaşım elementi olarak kullanılan borun yapıyı gevrekletmesidir. Bundan dolayı malzeme yapısında çatlamalara, kırılmalara sebebiyet verebilir. Eser miktarlardaki değişimler bile yapıda istikrarsızlıklara yol açar. Örneğin %0,005 kadar yapıda bulunan bor dökme demirdeki grafitin homojen dağılmasına, %0,007 kadar bor içermesi de yapının sertleşme derinliğinin artmasına sebep olur (Duman 2004). Bor yapıların metallere sağladığı yüksek dayanım, aşınma direnci, korozyon dayanımı, yüksek manyetik geçirgenlik, sıcaklık dayanımı, ısıyı soğurma ve ısı transferi gibi özelliklerin yanı sıra yüzeydeki tutunma özelliği de tercih edilme sebepleri arasındadır (Duman 2003). Ayrıca bor karbür demir esaslı malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek sertlik ve aşınmaya karşı direncin artırılması amacıyla geniş yelpazede kullanılabilir. Yüzeye sıcaklık ile difüze olan bor, demir ile bileşikler ( $FeB$  ve  $Fe_2B$ ) oluşturarak yüzeyin aşınma direncini artırır. Ticari Ekabor tozu bu amaçla kullanılmaktadır. Ekabor %90 SiC, %5  $B_4C$  ve %5  $NaBF_4$  içermektedir (Ulrich 1985). Son yıllarda hız kazanan bor karbür kaplamalar önemini gittikçe artırmaktadır. Çeliğe bor ilavesi ile hem basit karbonlu çelikler, hem de alaşımli çeliklerin sertliğini değiştirebilmek mümkündür. Alaşım elementleri olarak kullanılan diğer sertlik artırıcıların(Cr, Mo, Mn) maliyetine bakıldığında bor daha uygun bir çözüm olduğu görülmektedir. Alaşımli çeliklere %0.001-0.003 arasında bor ilave edilerek sertlik istenilen seviyeye getirilebilir (Gareth 1998).

Borun diğer alanlardaki kullanımını çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

**Çizelge 2.6** Borun endüstriyel kullanım alanları (TMMOB 2003).

<b>KULLANIM ALANI</b>	<b>KULLANIM YERLERİ</b>
Savunma Sanayi	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları, Fişek vb.
Cam Sanayi	Borosilikat Camlar, Laboratuvar Camları, Uçak Camları, Borcam, Pyrex, İzole Cam Elyaf, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe, diğer Düz Camlar, Otomotiv Camları vb.
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	Mikrodalga tüpleri, Sensörler, Süper iletkenler, Yarı iletkenler, Magnetler, Elektron emitterleri, Mikro Çipler, LCD Ekranları, CD-Sürücüler, Akım Levhaları, Bilgisayar Ağlarında; Isıya-Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Vakum Tüpler, Dielektrik Malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Kapasitörler, Gecikmeli Sigortalar, Bataryalar, Piller, Lazer Printer tonerleri vb.
Enerji Sektörü	Gaz türbinleri, Yüksek ısı transistörleri, Bor hidrür yakıtları(boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Piller, Hidrojen depolayıcılar, Güneş Enerjisinin Depolanması, Güneş Pillerinde Koruyucu olarak, Hücre Yakıtları vb.
Görüş Sistemleri	Kamera ve Mercek Camları, Fotoğraf Makinaları, Dürbünler, Banyo ve Film İmalatları
İlaç ve Kozmetik Sanayi	Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diş Macunları, Lens Solüsyonları, Kolonya, Parfüm, Şampuan vb.
İletişim Araçları	Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
İnşaat Sektöründe	Çimentoya mukavemet artırıcı ve izolasyon amaçlı olarak
Kâğıt Sanayi	Geri kazanılan kâğıtların mürekkeplerinden arındırılması, Yüksek kaliteli kâğıtların parlaklaştırılması, kâğıt hamurunu beyazlatılması,
Kimya Sanayi	Bazı Kimyasalların İndirgenmesi, Elektrolitik İşlemler, Flotasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalistler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve Cilalar, Kibrit, Kireçlenme Önleyicileri, Dezenfektan kimyasallar, Kozmetikler, yumuşatıcılar, Sabun, Toz Deterjanlar, Toz Beyazlatıcılar, Ağartıcılar, Parlaticılar, Ahşap emprenye çözeltileri, Mumyalama vb.
Koruyucu	Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak, Boya ve vernik Kurutucularında, Küf ve mantar önleyiciler, vb.
Makine Sanayii	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar Kompozit Malzemeler, Titreşim söndürücü malzemeler, Sert malzemeler, Motorlar, Katı yağlayıcılar, Yüksek sıcaklık sızdırmazlık contaları, Yüksek performanslı motor yağları, vb.
Metalürji	Kaplama elemanları, Yüksek sıcaklık refrakterleri, Kaplama Sanayisinde Elektrolit Olarak, Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Metalik Flaks, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler, Kompozit Malzemeler, Zımpara ve Aşındırıcılar vb.
Nükleer Sanayi	Nükleer Atık depolama (kolemanit cam bloklar), Reaktör Aksamları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak, Nükleer teknolojiye emniyet malzemeleri, vb.

**Çizelge 2.6 (Devam) Borun endüstriyel kullanım alanları (TMMOB 2003)**

<b>KULLANIM ALANI</b>	<b>KULLANIM YERLERİ</b>
Otomobil Sanayi	Titreşim söndürücü malzemeler, Hava yastığı şişirme mekanizmaları, Bor hidrür yakıtları (boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Hidrojen depolayıcılar, Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamalarda, Isı ve Ses Yalıtımı Sağlamak Amacıyla, Antifrizler, vb.
Seramik Sanayi	Emaye, Fayans, Porselen Boyaları, sırlar, vb.
Spor Malzemeleri	Kayak Aksamaları, Tenis Raketleri, Ok-yay, Balık Oltaları, Golf Sopaları, Darbe Söndürücüler, vb.
Tarım Sektörü	Sentetik gübreler, Biyolojik Gelişim ve Kontrol Kimyasalları, Küf ve mantar önleyiciler, Böcek-Bitki Öldürücüler, Yabani Otlar, vb.
Tekstil Sektörü	Isıya Dayanıklı Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, İzolasyon Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Dericilikte kireç çöktürücü, Suni İpek Parlatma Malzemeleri, vb.
Tıp	Yapay organlar, Antibiyotikler (boromisin), Osteopoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artrit, Menopoz Tedavisinde, BNTC Terapi Yöntemiyle Beyin Kanserlerinin Tedavisinde tümör öldürücüler, Manyetik Rezonans Görüntüleme Cihazlarında, vb.
Uzay ve Havacılık Sanayi	Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Zeplinler, Balonlar, Radar dalgası soğurucular, vb.

## 2.2 Borlama

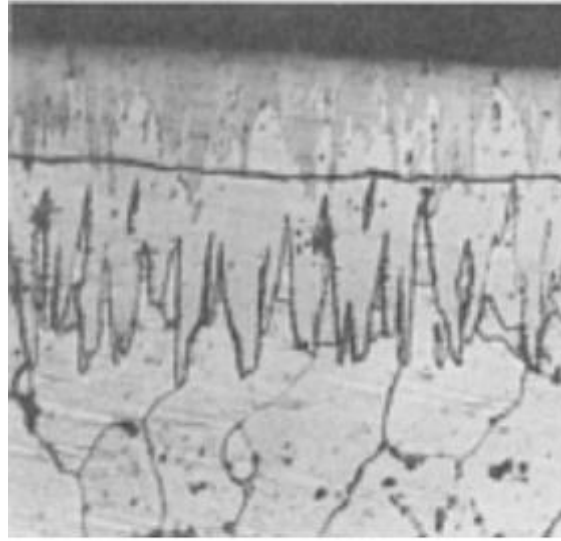
### 2.2.1 Borlama İşlemi

Borlama, uygun metal ya da alaşım yüzeyinde bor tabakası oluşturmak amacıyla yüksek sıcaklıklarda bor atomlarının difüzyonu ile gerçekleşen termokimyasal bir uygulamadır (Chatterjee-Fischer 1989, Sinha 1991, Thangaraj *et al.* 2013). Uygulama da kullanılan bor atomunun çapının küçük olması difüzyonu kolaylaştırdığından demir esaslı, demir dışı ve süper alaşımlar gibi çok geniş bir alana uygulanabilir (Lou *et al.* 2009, Torun *et al.* 2009, Mu *et al.* 2010).

Borlamanın temel özelliği uygulandığı yüzeylere yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, korozyon direnci ve oksidasyon direnci kazandırmasıdır (Cooper and Peterson 1990, Sinha 1991, Campos *et al.* 2008, Sahin 2009, Tabur *et al.* 2009, Torun *et al.* 2009, Jiang *et al.* 2011, Thangaraj *et al.* 2013). Demir esaslı malzemelerde borlama işlemi 840-1050 °C derecelerde yapılır. Borlama işlemi 1 ila 12 saat arasında yapılabilir (Jain and Sundararajan 2002, Tabur *et al.* 2009). Borlama işleminde sıcaklık ve süre parametrelerinin değişimleri, kaplama kalınlığını değiştirir (Aytekin and Akçin 2013).



Borlama işleminde Bor atomları demir atomları ile reaksiyona girerek, FeB ve Fe<sub>2</sub>B gibi bileşikler oluştururlar. Demir esaslı malzemelerde tek fazlı FeB oluşabildiği gibi çok fazlı intermetalik FeB+Fe<sub>2</sub>B'da oluşabilir. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere borlanacak yüzeyin üst tabaka kısmında FeB bileşiği oluşurken, alt tabakada Fe<sub>2</sub>B oluşur. Tek fazlı Fe<sub>2</sub>B fazı yüzeylerde istenilen termal genişleme sağlayarak kırılmayı azaltır. Borun yapmış olduğu güçlü kovalent bağ borlanmış yapının ergime noktasını yükseltir. Ayrıca Young Modülü ve sertliği de artırır (Özbek and Bindal 2011).

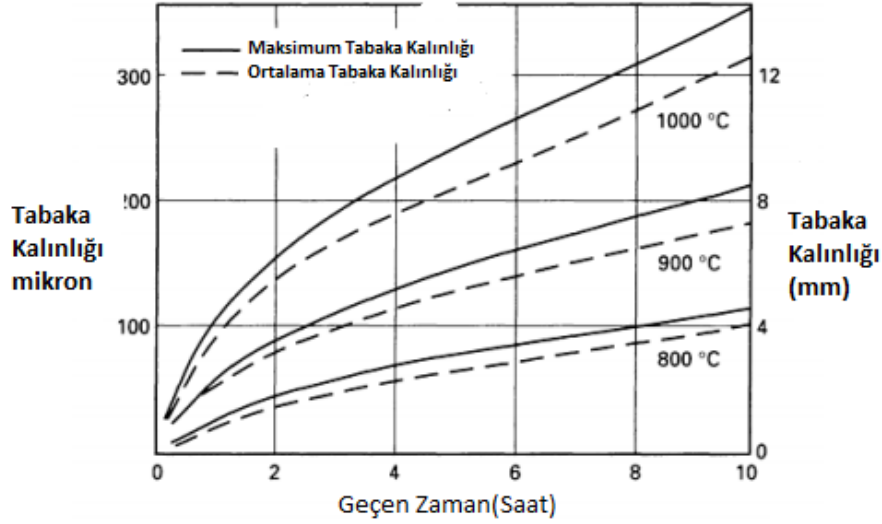


**Şekil 2.2** Düşük karbonlu St37 çeliğinin 900 °C'de borlanması sonucu FeB ve Fe<sub>2</sub>B yapılarının faz ayrımları (Özbek and Bindal 2011).

Ancak tek fazlı FeB fazının oluşumu istenmez bunun nedeni termal genişleme katsayısının oldukça fazla olmasıdır. Fe<sub>2</sub>B fazının termal genişleme katsayısı FeB fazından yaklaşık üç kat daha azdır. Genellikle çift fazlı yapılarda farklı genişleme katsayıları oluşturduğundan çatlak oluşturma riski çok fazladır. Bu çatlaklara bir mekanik yük uygulandığında ufalanma şeklinde dökülmelere yol açar. En ideal yapı düzgün cephesel yapı şeklindeki Fe<sub>2</sub>B fazıdır (Jain and Sundararajan 2002).

Borlama işleminde, borun yüzeye yayılması sonucu parçanın en üst yüzeyinde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, onun altında difüzyon bölgesi ve en iç kısımda ise çekirdek bölgesi yer alır (İnt.Kyn.13). Borlama işleminde tabaka derinliği, kullanılan malzemenin içyapısı, şekli ve uygulanan borlama yöntemine göre değişmektedir. Eğer bor tabakası kalın olması isteniyorsa daha çok düşük karbonlu çelik seçilebilir. Bu

çeliğin kaplama kalınlığı 0.05-0.25 mm arasında değişebilmektedir. Yüksek alaşımli çelikleri kaplama tabakası 0,025 ila 0,076 mm arasında değişebilir. Ekonomik olmayan bazı yüksek alaşımli ve takım çeliklerinde tabaka kalınlığı 0,089 mm bulabilir (Davis 2002, LHTC).



Şekil 2.3 Düşük karbonlu bir çelikte sıcaklık ve zaman değişimine göre oluşan bor tabakası kalınlığı (Davis 2002).

## 2.2.2 Borlama Yöntemleri

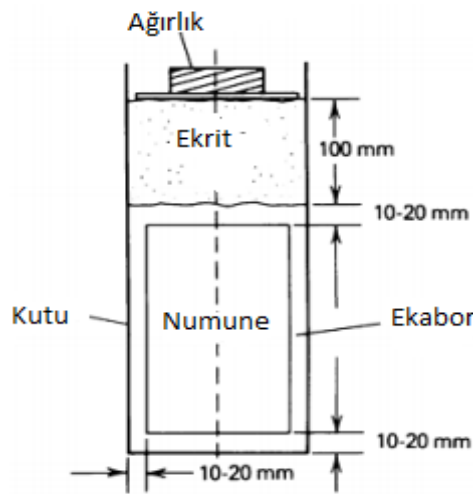
### 2.2.2.1 Katı Borlama

Genellikle katı borlama ya da kutu borlama diye adlandırılan bu sistemde kapalı bir ortam içerisine yerleştirilen parçanın etrafına katı haldeki bor bileşiğinin konularak, fırın içerisinde istenilen sıcaklığa getirilmesi ve bekletilmesi sürecidir. Bu yöntemin uygulanmasında dikkat edilecek husus borlama esnasında borlanacak parçanın dış atmosfer ile etkileşimini gidermek için inert bir ortam yaratılmalıdır. Katı borlama yönteminde kullanılan bor bileşiklerinin toz tane boyutu ne kadar küçük olursa yüzeyle etkileşimi o kadar fazla olacağından bor tabakasının yapısında, tane boyutu önemli yer tutar. Tane boyutu, oldukça küçük ve homojen olması arzu edilir. Bu yöntemin uygulama sıcaklığı 800 °C'den yaklaşık 1050 °C'ye çıkabilmektedir. Uygulama sıcaklığı ise 2 ila 10 saat arasında değişmektedir. İşlemin avantajı ucuz ve pratik olmasıdır (Davis 2002).

Borlama işleminde bor karbür ( $B_4C$ ), amorf bor yâda ferrobor kullanılmaktadır. Bu bileşenlerden Bor karbür diğerlerine nazaran daha ekonomik olmasından dolayı ucuzdur. Amorf bor ve ferrobor yapıları direk olarak kullanılamaz. Katı borlamada kullanılan bazı bileşik yapılar şöyledir: (Davis 2002).

- 1-  $B_4C$  (%100)
- 2- Amorf bor (% 95–97), % (3-5)  $KBF_4$
- 3- % 5  $B_4C$ , % 90  $SiC$ , % 5  $KBF_4$
- 4- % 50  $B_4C$ , % 45  $SiC$ , % 5  $KBF_4$
- 5- % 60  $B_4C$ , % 5  $B_2O_3$ , % 5  $NaF$ , % 30  $FeO$
- 6- % (40–80)  $B_4C$ , % (20-60)  $Fe_2O_3$
- 7- % 84  $B_4C$ , % 16  $Na_2B_4O$
- 8- % 95  $B_4C$ , % 5  $Na_2B_4O_7$
- 9- % (7,5-40)  $B_4C$  + % (2,5-10)  $KBF_4$  + % (50-90)  $SiC$
- 10- %20  $B_4C$  + %5  $KBF_4$  + %75 Grafit
- 11- %80  $B_4C$  + %20  $Na_2CO_3$
- 12- %50 Amorf bor + %1  $NH_4F.HF$  + %49  $Al_2O_3$

Katı borlama yönteminde Ticari Ekabor (%5  $B_4C$ , %90  $SiC$ , %5  $KBF_4$ ) kullanılmaktadır (Davis 2002).



Şekil 2.4 Katı borlama kutusunun şemasını gösteren kesit (Davis 2002).

Kutu borlama yönteminde, deney parçasının kutu içerisine yerleştirilmesi esnasında mutlaka kutuyla arasında 10-20 mm kadar boşluk bırakılmalıdır. İşlem esnasında gerek kutu yüzeyinde gerekse de deney parçasının yüzeyinde kir, yağ, pas vb. gibi yapıların olmamasına dikkat edilmelidir. Borlama yaklaşık 900-1000 °C'ye kadar yapıldığında kutu malzemesi yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı olacak şekilde seçilmelidir. İşlem sonrasında fırından çıkarılan kutuda termal şokların oluşumu önlenmelidir (Davis 2002).

Borlama işleminde aktivatör olarak  $\text{NaBF}_4$ ,  $\text{KBF}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_3\text{BF}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{BaF}_2$  ve  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}$  gibi ajanlar kullanılabilir. Akışkan yâda cüruf yapıcı olarak ise  $\text{SiC}$  kullanılabilir (Davis 2002).

Kutu borlama işleminde kullanılan borlama ajanları geri dönüştürülebilir. Bu ajanlar fiziksel olarak işlendikten sonra tekrar kullanılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, her çevrimde kullanılan geri dönüştürülmüş miktarın %30 ya da %40'ı kadar yeni toz kullanımını gerektirmesidir. Bir diğer husus ise dönüşüm yapılmış bor ajanları kullanılıyorsa işlem süresinin uzayacağıdır. Bu süre 20 saat ve daha uzun bir zaman dilimini alabilir (Davis 2002).

İşlem esnasında ortamdaki gazın oluşturacağı, istenilmeyen yapıları uzaklaştırmak amacıyla kullanılan kutu, yalıtılabileceği gibi bir diğer çözüm yolu ise ortam atmosferine inert ya da soy gazlar vererek çevresel reaksiyonlar engellenebilir. Genellikle koruyucu gaz olarak saf argon ya da saf azot gönderilerek işlem yapılabileceği gibi karışım gazları olarak, saf hidrojenle karıştırılmış argon ve azot gazı da kullanılabilir. Gaz kullanımında göz önünde bulundurulması gereken etmen oksijen ile reaksiyon vermeyen gazların tercih edilmesidir (Davis 2002).

Kutu borlamanın dezavantajı borlama tabakasının kontrol edilememesidir. Yani borun difüzyon işleminin homojen veya efektif yapılamamasıdır. Diğer bir dezavantajı ise yüzeyde oluşan porozitelerdir. Bu tür olaylarda unutulmaması gereken en önemli unsur kullanılan toz borun tane yapısının şekli, boyutu ve temas yüzeyi olduğudur (Davis 2002).

### 2.2.2.2 Pasta Borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın yapılması zor olduğu yerlerde maliyeti yüksek ve zaman kaybı olduğu yerlerde kullanılabilen bir yöntemdir. Bu yöntemde bir macun (45% B<sub>4</sub>C tane büyüklüğü 200 ve 240 mikron olan) ile %55 krylit (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, Akıcılık sağlayan malzeme), konvansiyonel borlama tozu karışımı (B<sub>4</sub>C-SiC-KBF<sub>4</sub>) kullanılır. İyi bir bağlayıcılık sağlayan örneğin nitroselüloz, butil asetat içinde çözünen metil selüloz veya hidrolize etil silikat ile bir sulu çözelti hazırlanır. Hazırlanan solüsyon fırça ya da sprey gibi yöntemlerle malzeme yüzeyine tatbik edilir. Tabaka kalınlığı kurutulduktan sonra 1 ya da 2 mm oluncaya kadar bu uygulamaya devam edilir. Daha sonra bir indüksiyon fırını ile 4 saat boyunca 900 °C veya 1650 °F'a kadar ısıtılarak yapılabileceği gibi, geleneksel fırınlarda da koruyucu gaz atmosferi kullanarak (Argon, NH<sub>3</sub> veya Azot) 800 ila 1000 °C derece sıcaklıklarda 5 saat süreyle ısı uygulanması sonucunda borlama işlemi yapılabilir. Pasta borlama işlemi daha çok karmaşık ve büyük yapılara uygulanır. Bu yapılarda homojen dağılan bir yapı şekli olmadığından bu yöntemin kullanılması zaman açısından büyük bir kolaylıktır (Davis 2002).

### 2.2.2.3 Sıvı Borlama

Sıvı borlama yöntemi elektrolitik(daldırma) ve elektrolizle sıvı borlama olmak üzere iki grupta toplanabilir. Bu yöntemin çokça dezavantajı bulunmaktadır. Bu yöntemde borlanacak malzeme sıvı bor bileşimi ortamında 600 ila 950 °C dereceleri arasında 2-6 saat zaman dilimlerinde uygulanabilir. Yöntemin dezavantajları ise şöyle sıralanabilir;

- 1- İşlem esnasında parça yüzeyinde oluşan aşırı tuz kalıntıları ve yüzeydeki reaksiyona girmemiş bor alanlarını ortamdaki uzaklaştırabilmek için harcanan zaman ve ekonomik kaybın olması.
- 2- Sistemdeki borlama işleminin sürekliliğini sağlamak için hazırlanan borlama banyosunun viskozitesini yitirmesi sonucu tekrar kullanımının ortadan kalkması. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için banyoyu tuz ile yeniden şarj etme ve maliyet sorunu.
- 3- Bazı durumlarda oluşan korozyon gazlardan korunma gerekebilir (Goeriot *et al.* 1981, Davis 2002).

Demir esaslı malzemeleri elektrik akımı kullanmadan tuz banyosunda borlanması işlemi, 900 ila 950 °C derecelerde boraks bazlı bir eriyik içerisine ağırlıkça %30 B<sub>4</sub>C ilavesi ile gerçekleştirilir (Goeuriot *et al.* 1981). Borlama işleminde bundan başka daha etkileyici bir indirgen kullanılarak daha iyi sonuçlar alınabilir. Örneğin %20 ağırlığındaki B<sub>4</sub>C ile ferro alüminyum eklenmesiyle daha da geliştirilebilir. Bundan daha iyi sonuçlar alabilmek için ise %55 boraks, %40-50 aralığında ferro-bor ve % 4-5 arasında ferro alüminyum eklenerek yapılan bir karışım kullanılabilir. Ayrıca %75-%25 KBF<sub>4</sub>-KF tuz banyosu hazırlanarak 670 °C'da nikel alaşımlarının borlanmasında kullanılabileceği gibi daha yüksek sıcaklıklarda ise demir alaşımlı malzemelerde de istenilen tabaka kalınlığının elde edilebileceği keşfedilmiştir (Hosokawa *et al.* 1972).

Bu yöntemde katota kaplanacak demir esaslı malzeme, anoda ise bir grafit çubuk bağlanır. Elektrolit sıvısını hazırlamak için, 940 °C'de eritilmiş boraks kullanılarak elektroliz için gereken ortam şartları hazırlanır. Ardında 0.15 A/cm<sup>2</sup> yoğunluklu akım gönderilerek 4 saat süreyle elektroliz işlemi gerçekleştirilir (Orning *et al.* 1962). Sonra parçalar havada soğumaya bırakılır. Genellikle homojen bir tabaka elde edebilmek amacıyla parça elektroliz sırasında döndürülür ya da hareket ettirilir. Özellikle düşük alaşımlı çeliklere, yüksek akım uygulandığında çok kısa bir sürede istenilen kaplama tabakası elde edilebilir. Yüksek alaşımlı çeliklere ise iyi bir kaplama tabakası için düşük yoğunlukta akım seçilip uygulama süresi uzatılarak iyi sonuçlar elde edilebilir (Fiedler and Sieraksi 1971, Davis 2002).

#### **2.2.3.4 Gaz Borlama**

Gaz borlama yöntemi benzer termokimyasal yöntemler olan karbürleme ve nitrürlemeden çok daha ekonomik oldukça verimli bir yöntemdir. Sonuçları daha önceden bilinen gaz ajanları diboran ve bor halojenler kullanılarak yapılabilir. İlk olarak gerek toksisite gerekse korozif olduğundan dolayı ticari olarak kullanılmamaktadır ve ticari olarak zararlı olarak etiketlenmiştir. Bir diğer tercih edilmeme nedeni ise düşük kalınlıkta (10 mm) kaplama yapılabilmesidir (Kuper *et al.* 2007).

Gaz borlama ajanları olarak şunlar kullanılmaktadır:

- Diboran (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)-H karışımı

- Bor halür-H<sub>2</sub> veya (75:25 N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>) gaz karışımı
- (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>B ve (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>B gibi organik bor bileşikleri içeren gazlar (Davis 2002).

Borlamada kullanılan Diboran (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)-H karışımı gerek patlayıcı gerekse doğal yaşam için zehirli olmasında dolayı ticari kullanımı yasaktır. Organik bor bileşiklerinin kullanılması ile karpit ve bor tabakası aynı anda oluşur. BBr<sub>3</sub> pahalı ve su ile şiddetli reaksiyonlar verebildiği için tehlikeli bulunmuş, BF<sub>3</sub> ise yüksek indirgenme sıcaklıkları gerektirdiğinden ve çevreye HF gazı saldığundan, en ideal çözümün borlamada BCl<sub>3</sub> kullanılması olduğu görülmüştür (Davis 2002, Hegewaldt 1984).

BCl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub> gaz karışımının 1'e 15 oranında seyreltilmesi ile 0,67 bar basınç altında parçaların 700-950 °C ısıtılmasıyla yaklaşık 120-150 mikron kalınlığında bor tabakası elde edildiği bildirilmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda H<sub>2</sub> gazı yerine (75:25) N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> gaz karışımı kullanılmasıyla tabakalarda oluşan FeB miktarını azaltarak daha iyi bir yapı elde edilmesi sağlamıştır. Böylelikle difüzyon işlemini takip eden sertleştirmeden hemen önce istenmeyen faz ortamdan uzaklaştırılabilir. Bu işlem titanyum ve alaşımlarına da uygulanabilir (Hegewaldt 1984, Davis 2002).

## **2.2.3 Bor Metal Bileşikleri ve Karakteristikleri**

### **2.2.3.1 Bor Tabaklarının Sertlikleri**

Borlama işlemi sırasında, bor atomları difüzyon enerjisiyle karşı elementin kafes yüzeyindeki latis yerleşir. Elde edilen tabaka tek fazlı yâda çok fazlı borürlerden oluşur. Bor tabakasının morfolojisi, ana malzeme içerisindeki alaşım elementleri ve faz oluşum mekanizmalarına göre değişmektedir. Çizelge 2.7'de görüldüğü gibi oluşan yapının sertliği de bu kompozisyonlara bağlı olarak değişir (Davis 2002).

Bor tabakaları, geleneksel sertleştirme yöntemleri yapılmış çeliklerden çok daha üstün sertlik değerlerine sahiptirler. Sertliğin (1400 ile 5000 HV) temel nedeni borun oluşturduğu bileşiklerin ergime notasının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Borlanmış çelikler ile geleneksel sertleştirilme yapılan çeliklerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması çizelge 2.7'de gösterildiği gösterilmiştir (Davis 2002).

**Çizelge 2.7** Borun çeşitli alaşım elementleri ile oluşturduğu fazların sertlik değerleri ve ergime noktaları (Davis 2002).

Alaşım	Oluşan Borür Bileşiği	Mikro sertlik Değeri (HV kg/mm <sup>2</sup> )	Ergime Sıcaklığı	
			°C	°F
Fe	FeB	1900-2100	1390	2535
	Fe <sub>2</sub> B	1800-2000	...	...
	CoB	1850	...	...
Co	Co <sub>2</sub> B	1500-1600	...	...
	Co <sub>3</sub> B	700-800	...	...
	CoB	2200	...	...
Co-27,5 Cr	Co <sub>2</sub> B	1550	...	...
	Co <sub>3</sub> B(?)	700-800	...	...
	Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub>	1600	...	...
Ni	Ni <sub>2</sub> B	1500	...	...
	Ni <sub>3</sub> B	900	...	...
Inco 100	...	1700	...	...
	Mo <sub>2</sub> B	1660	2000	3630
Mo	MoB <sub>2</sub>	2330	2100	3810
	Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	2400-2700	2100	3810
	W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	2600	2300	4170
Ti	TiB	2500	1900	3450
	TiB <sub>2</sub>	3370	2980	5395
	TiB		...	...
Ti-6Al-4V	TiB <sub>2</sub>	3000	...	...
	NbB <sub>2</sub>	2200	3050	5520
Nb	NbB <sub>4</sub>		...	...
	Ta <sub>2</sub> B		3200-3500	5790-6330
Ta	TaB <sub>2</sub>	2500	3200	5790
Hf	HfB <sub>2</sub>	2900	3250	5880
Zr	ZrB <sub>2</sub>	2250	3040	5500

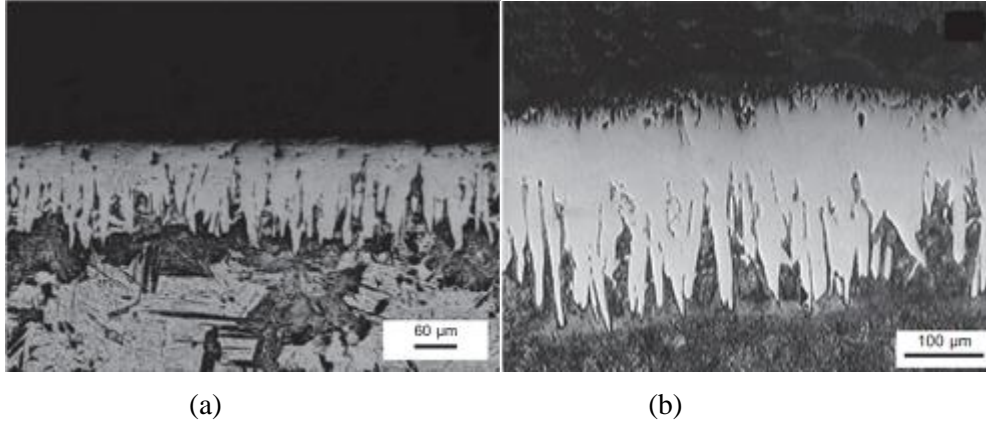
### 2.2.3.2 Borlanmış Düşük Alaşımlı Çeliklerin Yüzey Morfolojisi

Borlanmış düşük alaşımlı çeliklerin yüzey morfolojisi, her iki tarafı da testere dişli şeklindedir. Düşük karbonlu çeliklerde testere dişli borür yapısının büyüme karakteristiği impüriteler ve çatlaklara neden olur. Bu impüritelerin temel sebebi, bor tabakasında düşük karbonlu çeliğin içerisindeki Si, Cu, Sn gibi kalıntı elementlerin sonucudur (Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).

Carbucichio (1980), yılında yaptığı araştırmada kaplamanın uç kısımlarındaki çentikli



alanların yüksek yerel yüzey gerilimi ve kafesteki çarpılmalar nedeniyle gerçekleşebileceğini öne sürmüştür. Ayrıca Carbucicchio ve Palombarini (1987) geleneksel kutu borlama ile gerçekleşen güçlü borür tabakalarını ve büyüme dokularını göstermişlerdir. İlk aşamada yüzeyde borit çekirdeği oluşur. Borit çekirdeklerinin oluşumundan sonra yönelimleri ilk aşamada rastgele olmaktadır. Yönelim  $Fe_2B$ 'deki büyüme [001] yönünde gerçekleşir bunun nedeni bor atomlarının bu yöndeki yoğunluğunun maksimum olmasıdır. Bu nedenle borit taneleri numunenin yüzeyine dik [001] yönünde büyüme gösterirler. Bu yön dışındaki yönelimlerde diğer borit yapılar birbirlerine baskı yaptığından dolayı (002) yönünde büyüme yavaştır ve sürdürülmez (Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).

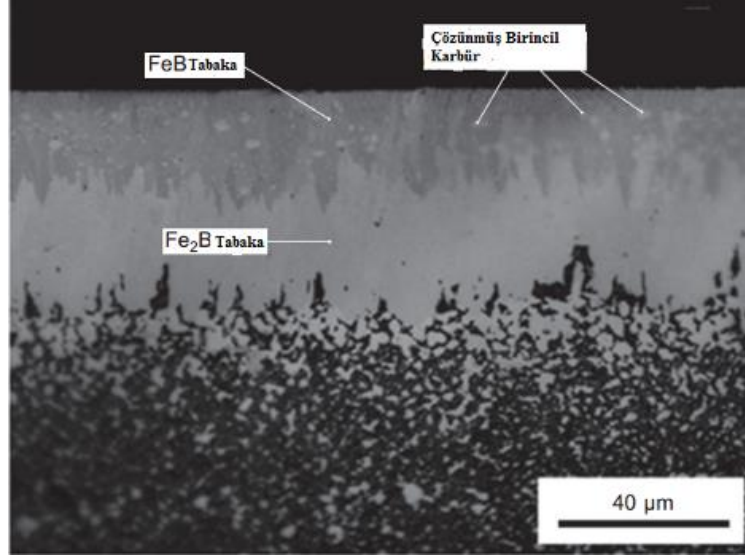


**Şekil 2.5** AISI 1080 düşük alaşımlı çeliğin borlanması ile elde edilmiş (a) 6 saat 1272 °K'de, (b) 8 saat 1272 °K'de testere diş yapısı (Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).

Testere dişli kaplamanın ana malzemedeki tutunması mükemmeldir. Tek fazlı  $Fe_2B$  yapısı iki fazlı  $FeB+Fe_2B$ 'e göre daha az kırılğan ve yüksek basma gerilimi oluşturur. Bu gerilim ise yüksek sertlik ve düşük süneklik için istenilen bir durumdur (Tabur *et al.* 2009, Jiang *et al.* 2011).

### 2.2.3.3 Borlanmış Yüksek Alaşımlı Çelikleri Yüzey Morfolojisi

Borlanmış yüksek alaşımlı çeliklerde bor tabakasında  $FeB/Fe_2B$  çift fazlı yapısının cephesel düzgün büyüme gösterdiği gözlenmiştir. Bu pürüzsüz düzgün yapının morfolojisini gözlemek için AISI M2 çeliği Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Campos-Silva 2009, Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).

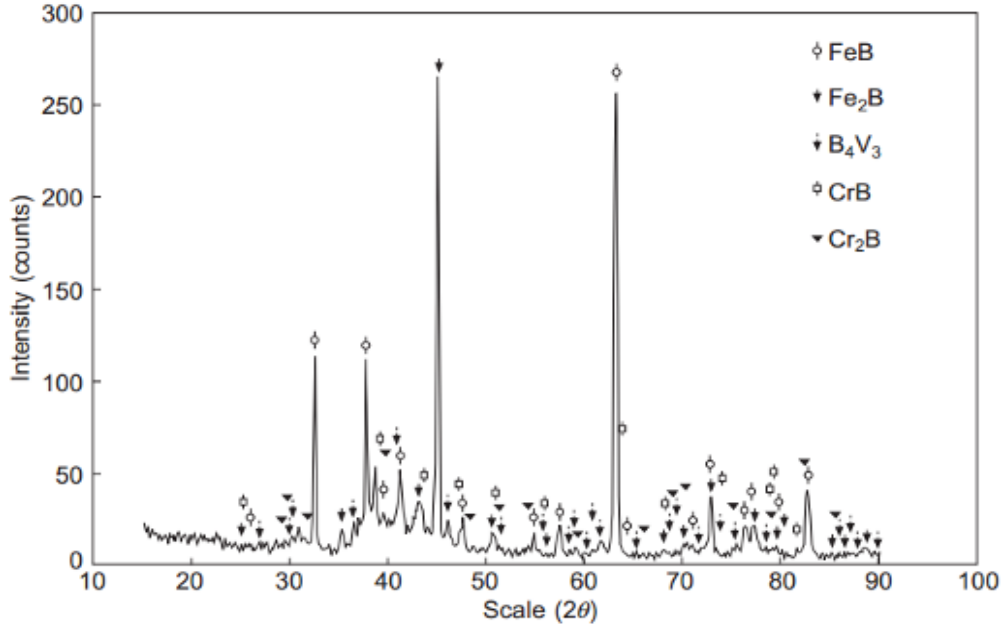


**Şekil 2.6** AISI M2 çeliğine 1273 °K’de 6 saat süreyle uygulanmış borlama işlemi sonucu yüzey morfolojisinin SEM analizi (Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).

Cr, Ni, W, V ve Mo gibi alaşım elementler bor tabakası içerisinde çözünür. Alaşım elementleri borit kolonlarının uç kısımlarında yoğunlaşarak, bor tabakalarının büyümesini engel olurlar. Bu bölgelerde aktif bor akışı azalacağından düşük karbonlu ve düşük alaşımlı borlanmış çeliklerle karşılaştırıldığında kolonsal büyümenin azaldığı görülebilmektedir (Campos-Silva 2009, Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).

Büyümedeki bu azalma FeB ve Fe<sub>2</sub>B’nin difüzyon bariyeri oluşmasına bağlı maksimum bor tabakası kalınlığı 40-80 mikron aralığında değişir. Bor tabakasının çevresinde çözünmemiş karbür yığınları bulunabilir bu yapılar karbon difüzyonu ile taşınır (Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).

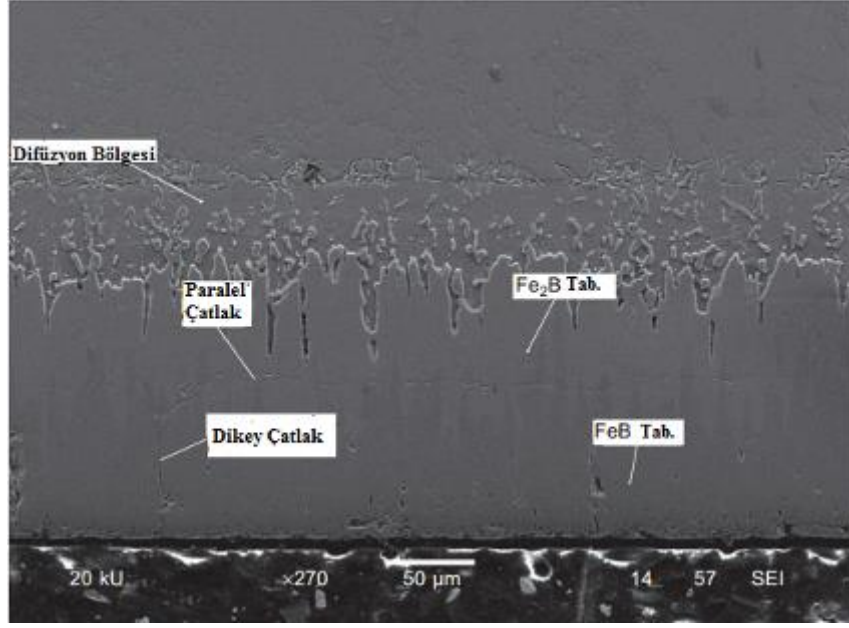
AISI M2 çeliğinin yüzeyindeki faz yapıları XRD yöntemiyle Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Daha önce yapılan birçok çalışmada krom elementinin FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarının dış bölgelerinde biriktiği görülmüştür. Buna paralel olarak molibden elementinin çözünme eğiliminin daha düşük olması ve yüzeyin alt malzeme katmanlarında yoğunlaştığı bilinmektedir (Dukarevich *et al.* 1973, Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015). FeB ve Fe<sub>2</sub>B yapıları tespit edilmiştir. Buralarda (002) tarafına güçlü bir yönelme vardır (Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).



**Şekil 2.7** AISI M2 çeliğinin 1273 °K’de 6 saat boyunca borlanması sonucu oluşan bor tabakasının XRD analizi (Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).

Bindal ve Üçışık, borlanmış yüksek alaşımlı çeliklerde FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının oluşumları tabakada kalıntı gerilmeleri oluşturarak mekanik özellikleri azaltır. (FeB-çekme gerilimi, Fe<sub>2</sub>B-basma gerilimi). Bu gerilmeler yüzeyde çatlamalara ve pul pul dökülmelere neden olmaktadır (Bindal *et. al* 2008).

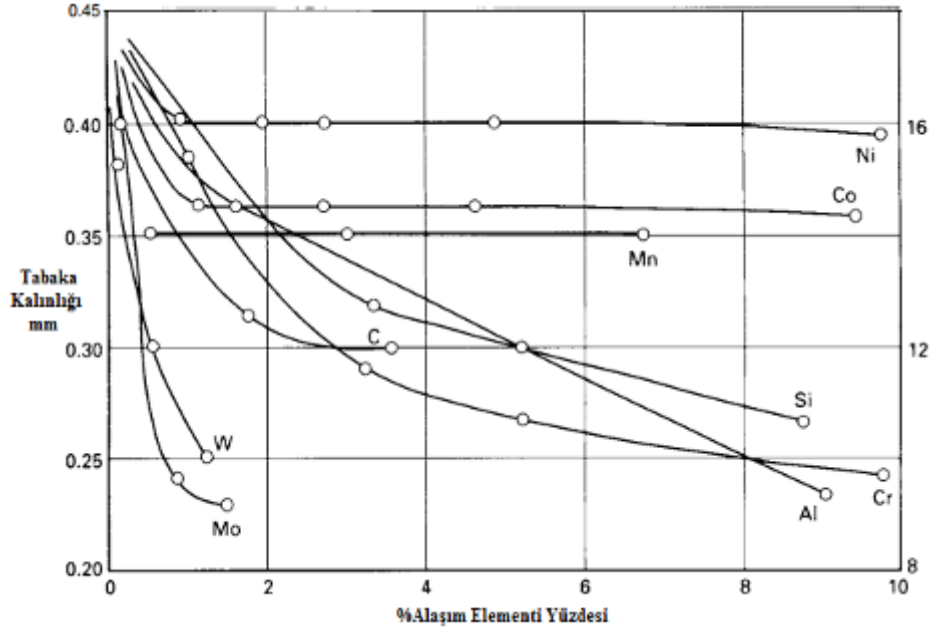
Bor tabakasının alt-tabaka sisteminde çelikler için üç tip çatlak görülebilir; Çatlaklar FeB/Fe<sub>2</sub>B ara yüzünde yüzeye paralel, FeB/Fe<sub>2</sub>B ara yüzünden yüzeye dik ve alt malzemenin alt tabanına dik şekilde bulunur. Çatlakların birinci ve ikinci türü, borlama sonucu soğutma hızına bağlı olarak gelişmektedir. Üçüncü tip ise borlanmış çeliğe su verilmesi, alaşımlı çeliklerde bulunan Fe<sub>2</sub>B tabakasının çok kalın olmasından kaynaklanır. AISI H13 borlanmış çeliğinde ilk iki çatlak Şekil 2.8’de gösterilmiştir (Rile 1974, Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).



**Şekil 2.8** Borlanmış AISI H13 çeliğinde dikey ve paralel çatlakların SEM analizi (Rile 1974, Campos-Silva and Rodríguez-Castro 2015).

#### **2.2.3.4 Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi**

Alaşım elementleri bor tabakasının yapısını ve bileşimini çok geniş alanda değiştirebilir. Bor tabakasının klasik “testere dişi” yapısı daha çok saf demir, düşük karbonlu çeliklerde ve düşük alaşımlı çeliklerde görülmektedir. Alaşım elementleri, tabakanın testere diş yapısından düz kolonsal yapıya geçişini etkileyen en önemli unsurdur. Şekil 2.9’da alaşım elementlerinin zamanla bor tabakasına etkisi gösterilmiştir (Davis 2002).



Şekil 2.9 Alaşım elementlerinin bor tabakası kalınlığına etkisi (Chatterjee-Fischer 1986).

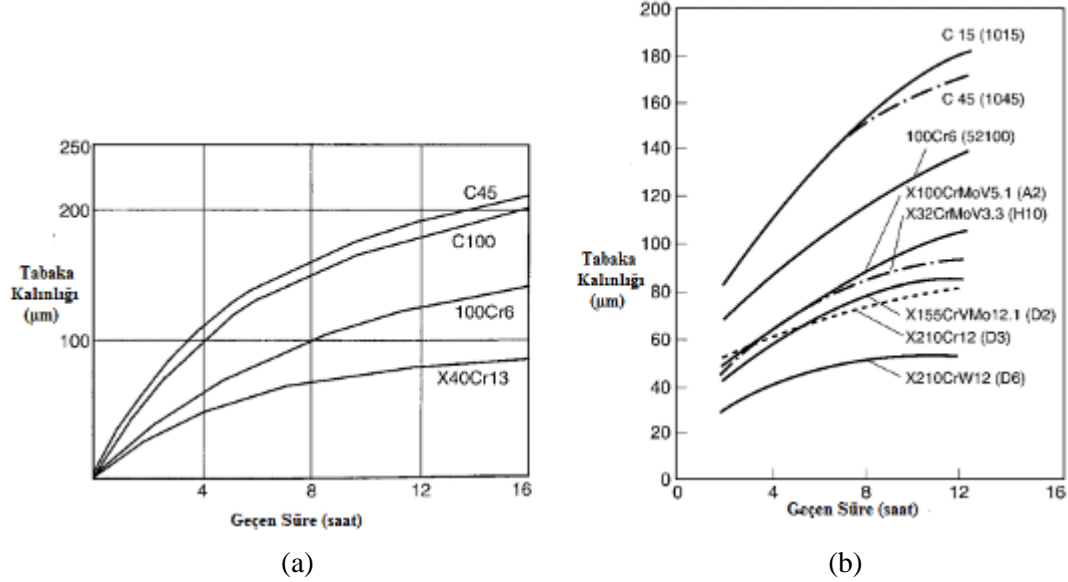
Karbon, elementi bor tabakasında belirgin bir çözünme göstermez ve bor tabakasında difüze olmaz. Difüzyon ile dışarı sürülen karbon, bor ve demir ile borosementiti  $Fe_3(B,C)$  oluşturur (Davis 2002).

Silisyum ve alüminyum, karbona benzer etkiler yaparak bor tabakasında çözünmezler. Silisyum  $Fe_2B$  tabakasının altında demir ile bileşik yapar. Çeliğin içerisindeki bu elementler ferrit yapıcı özelliklerinden dolayı yumuşak bir yapı oluşturarak bor tabakasının aşınma direncini düşürür. Oluşan ferritik bileşikler kaplama tabakasıyla arasında “yumurta kabuğu” etkisi yapar (Davis 2002).

Nikel, oluşacak bor tabakasının derinliğini ve dış yapılarının oluşumunu azaltır. Nikel bor bileşikleri, bor tabakasının altında çökelerek  $Fe_2B$  fazına karşılık gelerek bu yapıyı baskılar. Bu etkiler genellikle östenitik paslanmaz çeliklerde görülür (Davis 2002).

Krom, yapıyı ve bor tabakasının özelliklerini değiştirir. Bor ile zengin bileşikler oluşturarak bor tabakasını azaltır. Ayrıca kaplama ile alt tabaka arasında yumuşama ya da bor tabakasında düzleşme meydana getirir. Bor tabakasını azaltmasının yanında, karbonla üç fazlı  $Fe-12Cr-C$  yapısını oluşturur (Davis 2002).

Tungsten, molibden ve vanadyum, gibi elementler bor tabakası kalınlıklarını azaltır. Ayrıca yapının çentik derecesini azaltır. Bor tabakası kalınlığının alaşım elementleri ile değişimi aşağıdaki şekilde verilmiştir (Davis 2002).



**Şekil 2.10** Bor tabakası kalınlığının alaşım elementleri ile değişimi (a) karbon (C45 - %0.5C; C100 - %1.03C) ve krom (100Cr6 - %1.1C-1.6Cr; X40Cr13 - %0.35C -12.5Cr), (b) krom, tungsten, vanadyum ve molibden (Davis 2002).

### 2.3 Yüksek Hız Çelikleri

Yüksek Hız Takım Çelikleri (High Speed-Tool Steel, HSS) öncelikli olarak yüksek hızda kesme yetenekleri nedeniyle bu isimle adlandırılmışlardır. Bu çelikler yapısındaki kompleks demir bazlı karbon alaşımları, krom, vanadyum, molibden, tungsten ve kobalt gibi alaşım elementlerinin kombinasyonunu bünyelerinde barındırır. Karbon ve alaşım elementlerinin etkisiyle yapılan ısıl işlemler sonucu; yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklıklara dayanım ve iyi tokluk gibi özellikleri barındırırlar. Ticari açıdan iki grup özellikteki örnekler geliştirilmiştir ve bu grupların karşılaştırılması çizelge 2.9'da yapılmıştır. Bunlar (Bayer *et al.* 1995);

- Şiddetli bir kesim yapabilmek için geliştirilmiş olan Standart çelikler,
- Orta şiddette sınırlı uygulamalar için kesim yapabilmek için geliştirilmiş olan ara yapıdaki çelikler

### 2.3.1 Yüksek Hız Çeliklerinin M ve T Sınıfı

Aşağıdaki çizelgede yüksek hız çeliklerinin kompozisyonlarına göre sınıflandırılması verilmiştir.

**Çizelge 2.8** Yüksek hız çeliklerinin kompozisyonlarına göre sınıflandırılması (Davis 2002).

AISI Standart	C	Si	Cr	V	W	Mo	Co
<b>Molibden Oranı Yüksek olan Çelikler</b>							
M1	0,83	0,35	3,75	1,18	1,75	8,70	...
M2 Normal C	0,83	0,33	4,13	1,98	6,13	5,00	...
M2 Yüksek C	1,00	0,33	4,13	1,98	6,13	5,00	...
M3 Sınıf 1	1,05	0,33	4,13	2,50	5,88	5,63	...
M3 Sınıf 2	1,20	0,33	4,13	3,00	5,88	5,63	...
M4	1,33	0,33	4,25	4,13	5,88	4,88	...
M6	0,80	0,33	4,3	1,50	4,25	5,00	12,00
M7	1,01	0,38	3,75	2,00	1,75	8,70	...
M10 Nor. C	0,89	0,33	4,13	2,00	...	8,13	...
M10 Yük. C	1,00	0,33	4,13	2,00	...	8,13	...
M15	1,50	0,33	4,00	5,00	6,50	3,50	5,00
M30	0,80	0,33	4,00	1,25	2,00	8,00	5,00
M33	0,89	0,33	3,75	1,18	1,70	9,50	8,25
M34	0,89	0,33	3,75	2,10	1,75	8,48	8,25
M35	0,80	0,33	4,00	2,00	6,00	5,00	5,00
M36	0,85	0,33	4,13	2,00	6,63	3,75	8,25
M41	1,10	0,40	3,88	3,00	10,00	5,13	9,00
M42	1,10	0,40	3,88	1,15	1,50	9,50	8,25
M46	1,26	0,53	3,95	3,15	2,05	8,25	8,30
M48	1,50	0,33	3,88	3,00	10,00	5,13	9,00
M50	0,80	0,40	4,13	1,00	...	4,25	...
M52	0,90	0,40	4,00	1,93	1,25	4,45	...
<b>Tungsten Oranı Yüksek Olan Çelikler</b>							
T1	0,73	0,30	4,13	1,10	18,00	...	...
T4	0,75	0,30	4,13	1,00	18,25	0,70	8,25
T5	0,80	0,30	4,38	2,10	18,25	0,88	8,25
T6	0,80	0,30	4,38	1,80	19,75	0,70	12,00
T8	0,80	0,30	4,13	2,10	14,00	0,70	5,00
T15	1,55	0,28	4,38	4,88	12,38	1,00	5,00

Amerikan Demir-Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından yüksek hız çeliklerine 40 ayrı sınıflama yapılmıştır. Üreticilerden alınan verilerle 150'ye yakın yüksek hız çeliği çeşidi olduğu anlaşılmıştır. Çeliklerin sınıflandırılmasında birincil alaşım elementleri ön

plana çıkmaktadır. En yüksek birincil alaşım elementi tungsten olanların başında T harfi eklenmiş, birincil alaşım elementi molibden olanlar ise M harfi ile başlaması sağlanmıştır. Bunlara ek olarak numaralar verilerek çelikler kategorize edilmişlerdir. Böylelikle çelikler M2, M35, M42, T1 gibi sınıflandırılmışlardır. Harften sonra eklenen sayıların herhangi bir anlamı yoktur (Bayer *et al.* 1995).

### **2.3.2 AISI M35 ve M42 Çeliklerinin Özellikleri ve Kullanım Alanları**

AISI M35 Çeliği, yapısında %5 kobalt elementi ihtiva eden, yüksek hız-takım çeliğidir. Yüksek sıcaklıklarda sertliğini muhafaza edebilme özelliğine sahiptir. Daha yüksek aşınma dayanımı isteyen; azdırma frezeleri, profil frezeler, matkap uçları, gibi kullanım alanları mevcuttur. Tel erozyonda kesim işlemine, kaynak, PVD ve CVD kaplamaya uygundur (Wick 1987).

Ultra sert bir yüksek hız çeliği türü olan AISI M42 çeliğinin sertliği yaklaşık 70 HRC'dir. Çok yüksek sertliklere çıkabilen ve çalışma ortamında bu sertliği muhafaza edebilen %8 kobalt elementi içerikli yüksek hız çeliğidir. Aşınma dayanımı çok yüksek olduğundan birçok azdırma frezeleri, broş ve makas bıçakları yaygın kullanım alanlarıdır. Tel erozyonda kesim işlemine, kaynak, PVD ve CVD kaplamaya uygundur (İnt.Kyn.14 ve İnt.Kyn.15).

### **2.4 Aşınma**

Sürtünme ve aşınma bir yüzeyin başka bir yüzeye değmesiyle oluşan, yüzeylerin mekanik etkisi ve birbiri üzerindeki hareketi sonucu meydana gelen karmaşık ve mikroskobik bir etkileşimdir. Bu etkileşim sonucu oluşan malzeme yüzeylerinin geometrik ve topografik karakteristikleri, her iki yüzeye etki eden kuvvetler, sıcaklık, kayma hızı, yüzeylerin durumları(ıslak, kuru) ve atmosferin şartları gibi pek çok faktöre bağlı olarak değişmektedir (Axén *et al.* 2001). Aşınma olgusu, sürtünmenin neden olduğu bir mekanik etki ile malzemenin üst katmanından başlayan pul pul dökülmelere verilen isimdir. Sürtünme, iki yüzeyin birbiri ile mekanik etkileşimidir (JIS 2007). Sürtünme ve aşınma bir malzeme özelliği değil, sistemin yanıtıdır. Malzemenin çalışma şartları aşınan ara yüzü doğrudan etkiler. Aşınma esnasında bir ya da iki katı yüzeyde



kayma, dönme ve darbe etkisiyle hasar meydana gelir. Ara yüzlerde meydana gelen yüksek sürtünme değerleri beraberinde yüksek aşınma değerlerini de getirir gibi bir algı oluşsa da bu tamamıyla doğru değildir. Örneğin polimer benzeri ara yüzler, yüksek sürtünme ortamlarında dahil düşük aşınmaya neden olabilir yada seramik ara yüzlerde düşük sürtünme değerlerinde yüksek aşınma gelişebilir. Yine oluşan başka bir yanlış algı ise aşınmanın istenilmeyen bir hasar olmasıdır. Bu durum ise şöyle açıklanabilir; Örneğin bazı, torna, frezelerle üretilen talaşlı imalata parçalarının aşınması istenilen bir durum iken rulman, dişli gibi yük-hareket elemanlarında aşınma arzu edilmez (Bhushan 2013). Sürtünme, aşınma ve enerji kaybının temel sebebidir (Amiri and Khonsari 2010). Aşınma, triboloji biliminin dallarından birisidir. Bir tribo sistem içerisinde aşınmaya etki eden unsurlar şunlardır (Bayer 2002);

- Etkileşim içerisindeki malzemeler
- Malzemenin geometrik parametreleri(boyutu, şekli vs.)
- Bağlı hareket
- Yük
- Yağlama durumu
- Çevre şartları(sıcaklık vs.)

Aşınma durumunu açıklayabilmek için ise şunlar bilinmelidir (Bayer 2002);

- Temas alanı
- Temas hızı
- Temas bölgesi
- Giriş açıları

Aşınma kavramının daha iyi anlaşılabilmesi için sürtünme ve sürtünme kuvveti tanımı üzerinde durulmalıdır. İki malzeme yüzeyi birbiri ile temas ettiğinde meydana gelen kayma esnasında uygulanan kayma kuvveti  $F$ , uygulanan yük ise  $W$  ile ifade edilirse bu ikisi arasındaki doğru orantılı bağıntı şöyle ifade edilebilir (Stachowiak and Batchelor 2013);

$$F=\mu W \quad (2.5)$$

Formüldeki (2.5)  $\mu$ , sürtünme katsayısı olarak ifade edilir. Uygulanan kayma kuvveti yüzeye ve uygulanan yüke dik olursa (2.6) sürtünme kuvveti bir olarak alınır (Stachowiak and Batchelor 2013);

$$F=W \quad (2.6)$$

Sürtünme kayan yüzeyler arasındaki enerji dağılımı olarak tanımlanabilir. Vinci ve Amanton tarafından dört temel deneysel sürtünme kanunu şöyle açıklanabilir (Stachowiak and Batchelor 2013);

- Kayan yüzeylerdeki maksimum tanjant kuvveti ve hareketsiz yüzeydeki normal kuvvet arasındaki orantı, tanjant kuvvetinin artmasına bağlı değişir.
- Sürtünme kuvveti, kayma kuvveti ve normal kuvvet ile orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti temas alanından bağımsızdır.
- Sürtünme kuvveti kayma hızından bağımsızdır.

Gerçek yüzeylerdeki yükseltelerin meydana getirdiği gerilimler plastik deformasyon miktarını artırmaktadır. Amanton yasasına göre sürtünme kuvveti uygulanan yük ve gerçek temas alanı ile orantılıdır (Stachowiak and Batchelor 2013).

#### **2.4.1 Aşınma Mekanizmaları**

Genellikle temel aşınma mekanizmalarının aşınma türlerine göre sınıflandırılması daha iyi anlaşılabilirlik açısından oldukça yararlı olacaktır. Böylelikle aşınma kimliği daha iyi belirlenebilecektir. Aşınma mekanizmaları genellikle altı grup altında sınıflandırılabilir. Bunlar;

- Yapışma mekanizmaları
- Tek-döngüsel deformasyon mekanizmaları
- Tekrarlayan-döngüsel deformasyon mekanizmaları

- Kimyasal mekanizmalar
- Termal mekanizmalar
- Tribofilm mekanizmaları

Birden fazla türdeki aşınmalar bu mekanizmalara dahil edilebilir. Ayrıca daha karmaşık aşınma ortamlarında bu mekanizmalar kullanılarak, etkileşimleri bulunabilir (Bayer 2002).

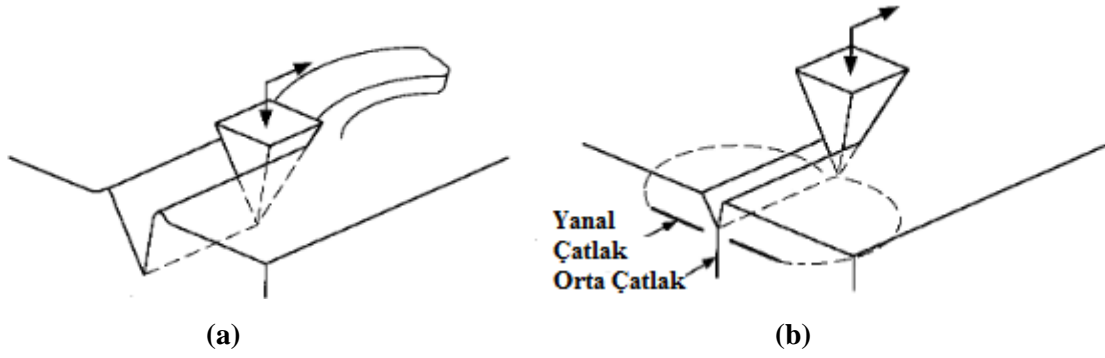
Aşınma genellikle mekanik, kimyasal ve termokimyasal(ısı-difüzyon) olarak karakterize edilebilir. Bu karakterizasyonuna sağlayan beş aşınma türü;

- Abrasif aşınma
- Adhesif aşınma
- Yorulma aşınması
- Darbeye bağlı erozyon yada perküsyon aşınma
- Kimyasal ya da korozyon aşınma

olarak sıralanabilir (Czichos 1978).

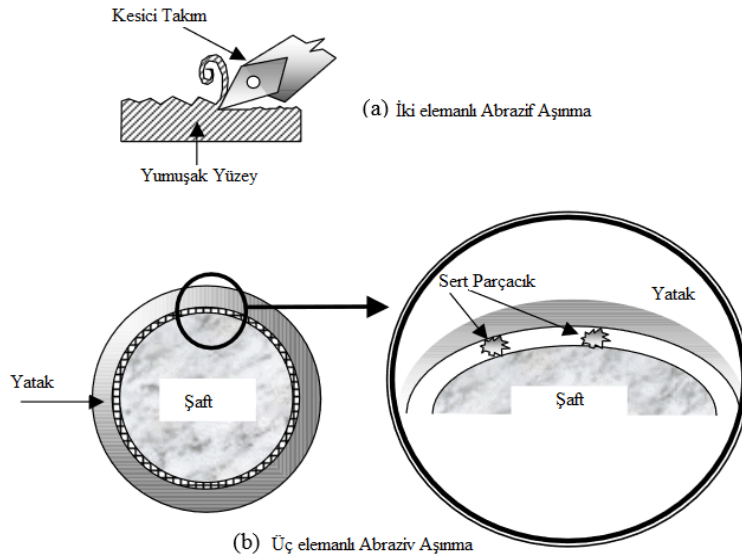
#### **2.4.2 Abrasif Aşınma**

Abrasif aşınma, katı bir yüzey boyunca mevcut malzemedeki daha sert parçacıklar ve sert çıkıntılarının yaptığı sürtünme nedeniyle oluşan aşınmadır. Aşınma esnasında temas eden yüzeylerin hareketleri arttıkça aşınan malzeme miktarı da artar (Tylczak *et al.* 1992). Sert keskin bir aşındırıcının sünek düzgün bir yüzeyde kuvvet uygulanarak hareket ettirilmesi sonucu yüzeyde oluk ya da pullanma şeklinde malzeme kaybı olur. Gevrek bir malzeme ise çatlak oluşumuna neden olan kırılmalara yol açar. Şekil 2.11'de her iki malzeme için oluşan aşınma bölgeleri gösterilmiştir (Kato and Adachi 2001).



**Şekil 2.11** Gevrek ve sünek malzemelerde oluşan aşınma bölgeleri (a) sünek bir malzemenin (b) gevrek bir malzemenin sert bir cisimle aşındırılması (Kato and Adachi 2001).

Şekil 2.11 (a)'da, sünek bir malzemenin sert bir cisimle aşındırılması sonucu oluk şeklinde malzemenin ayrılması söz konusu iken, şekil 2.11 (b)'de ise gevrek bir malzemenin sert bir cisimle aşındırılması sonucu yüzeyde çatlaklar oluşmaktadır. Bu aşınma türü genel olarak kesici takımların (takım çelikleri, HSS) yapmış olduğu aşınma türüdür ve karşı malzemede plastik deformasyon ya da kırılmaya yol açar. İki ya da üç parçalı olmak üzere ikiye ayrılır (Smith 1998).



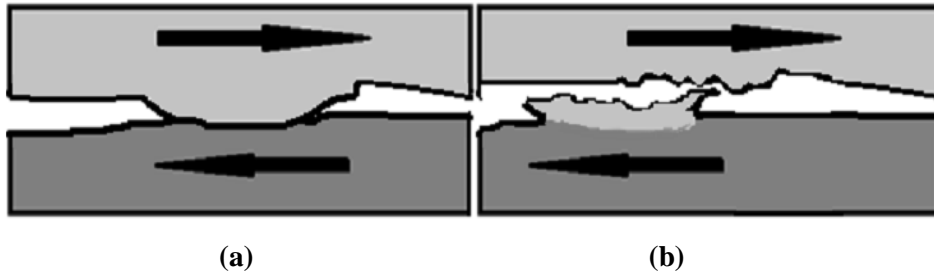
**Şekil 2.12** Abrasif iki ve üç elemanlı aşınma şematığı (Stokes 2008).

İki elemanlı abrasif aşınma. Bir yüzeyin diğer bir yüzeyden çok daha sert olmasıyla meydana gelir. Bu aşınma kesme ve taşlama işlemlerinde gerçekleşir (Şekil 2.12 a). Üç elemanlı abrasif aşınmada ise iki yüzey arasında girmiş ve her iki yüzeyden de sert bir

kütle(aşındırıcı kum vs.) sürtünen yüzeylerin biri ya da her ikisini aşındırmasıyla meydana gelir (Şekil 2.12 b). Yüzeylerdeki sürtünmeyi azaltmak için hidrodinamik ya da elasto hidrodinamik yağlayıcılar kullanılabilir (Stokes 2008).

### 2.4.3 Adhesif Aşınma

İki katı malzemenin yüzeylerinin birbiri üzerinde kayma ya da haddelemesi sonucu yapışma (adhesif) aşınması meydana gelir. Yerel yükselti noktalarının iki malzemeye temas etmesiyle atomların birbiriyle bağ ilişkisi sonucu bu aşınma oluşur. Temas noktalarında kayma hareketi sonucu plastik deformasyon oluşur. Kayma sonucu yüzeyde hasar meydana gelir. Adhesif aşınma şekil 2.13’de şematik olarak gösterilmiştir (Tylczak *et al.* 1992).



**Şekil 2.13** Adhesif aşınma (a) kaymaya başlamadan önce yüzeylerin birbirine yapışması (b) kayma sonrası yüzeyde oluşan yapışmadan sonra meydana gelen plastik deformasyon sonucu malzeme kaybı (Tylczak *et al.* 1992).

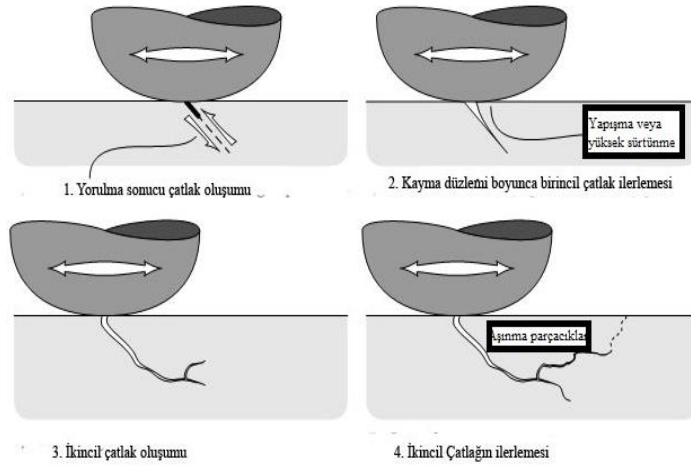
Yapışma aşınması yüzeylerde bulunan yükseltilere, uygulanan basınç nedeniyle moleküler bağların yapışması sonucu meydana gelir. Adhesif aşınmayı azaltan etmenler şunlardır;

- Düşük yük
- Sert sürtünme malzemeleri
- Kirli sürtünme yüzeyleri
- Katı yağlayıcıların varlığı
- Yağlayıcıların varlığı (İnt.Kyn.16).

#### 2.4.4 Yorulma Aşınması

Temas halindeki yüzeylerde, tekrarlanan sürtünme çevrimleri bölgelerinde yorulma kırılması meydana gelir. Yüzey hasarı yorulma nedeniyle oluşmuşsa bu aşınmaya yorulma aşınması denir (İnt.Kyn.17).

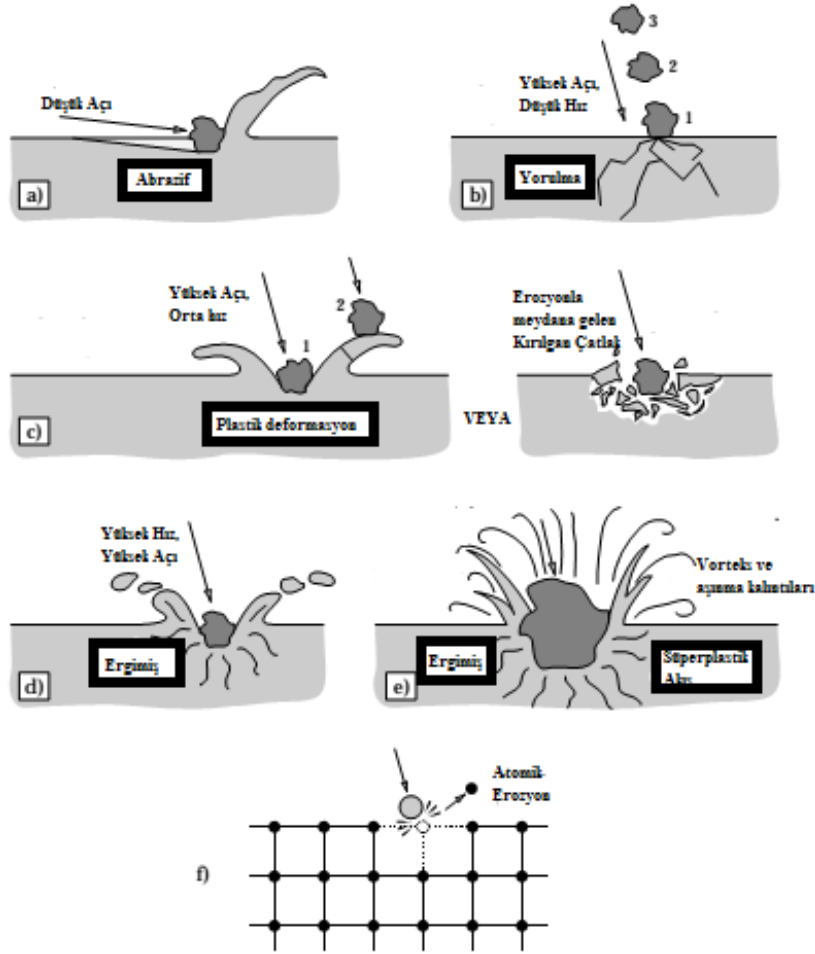
Aşınma, bir iz üzerinden tekrarlanan kayma veya yuvarlanma sırasında gözlenir. Yükleme ve boşalmalara maruz kalan malzeme yüzeylerinde çatlaklar meydana gelir. Oluşan bu çatlaklar, yüzeyde daha büyük çatlaklar oluşturarak çatlama neden olur ve yüzeyde büyük çukurlar bırakırlar (Oğuz 1993). Yorulma aşınması sonucu oluşan çatlakların şeması şekil 2.14’de gösterilmiştir (Stachowiak and Batchelor 2013).



**Şekil 2.14** Belirli bir çevrim altındaki bir yüzeyde meydana gelen çatlak oluşumları (Stachowiak and Batchelor 2013).

#### 2.4.5 Eroziv Aşınma

Katı parçacık erozyonu, sert parçacıklar ile yüzeyin bombardıman edilmesi olarak nitelendirilebilir. Diğer aşınmalarda olduğu gibi yüzeyde çatlak ve plastik deformasyon oluşturur. Yüzeyde oluşan bu tür hasarlar kütle, parçacık hızı, sıkışma açısı gibi etmenlere bağlıdır. Erozyon aşınmasında, aşındırıcı kumların sertliği, şekli, tokluk ve şiddeti malzemedeki erozyon oranının belirler. Bu aşınma sırasında bozulmuş aşındırıcılar ve geri dönüştürülmüş aşındırıcılar kullanılmamalıdır (Stachowiak and Batchelor 2013).

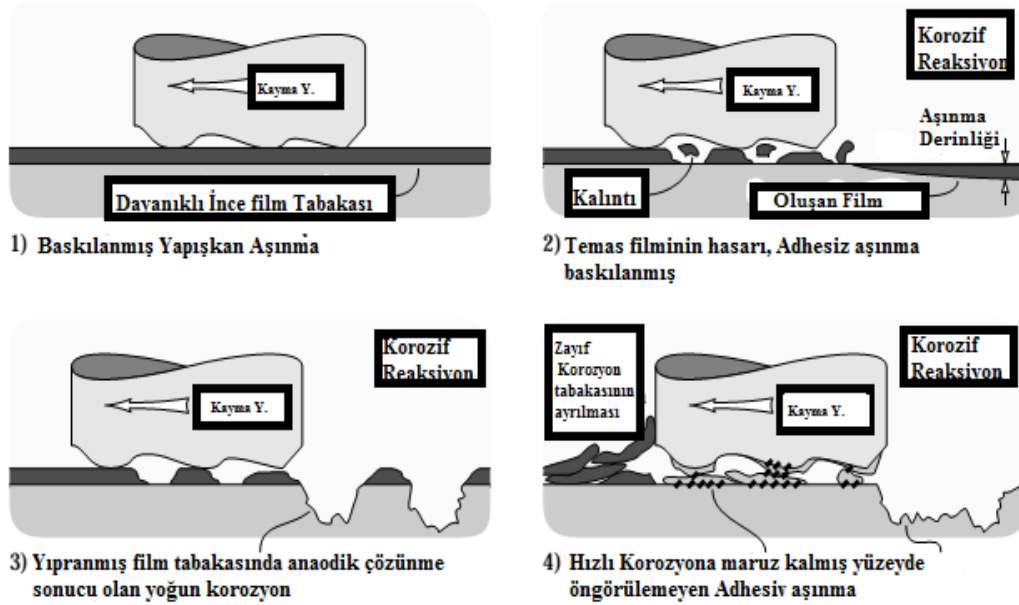


Şekil 2.15 Erozif aşınma mekanizmaları (Stachowiak and Batchelor 2013).

Erozif aşınmada küçük partiküllerin meydana getirdiği aşınma mekanizmalarında belirsizlik hâkimdir. Bunun gereği olarak deneysel ve pratik aşınma mekanizmaları daha önem arz eder. Erozif aşınma mekanizmaları Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Şekil 2.15 (a)’da düşük darbe açısıyla meydana gelen abrazyon, (b)’de yüksek darbe açısı ve düşük hız çevrimlerinde yüzeyde meydana gelen yorulma, (c)’de yüksek darbe açısı ve orta hızda birden fazla plastik deformasyon sonucu yüzeyde meydana gelen kırılma çatlakları, (d)’de yüksek darbe hızında ergimiş yüzey, (e)’de Mikroskobik erozyonun oluşturduğu ikincil etkiler, (f)’de enerji verilmiş atomlar tarafından kristal kafes bozulmaları gösterilmiştir (Stachowiak and Batchelor 2013).

## 2.4.6 Koroziif Aşınma

Aşınmaya uğramış yüzeylerde buna ek olarak kimyasal reaksiyonlar meydana gelmesiyle oluşan malzeme kaybına koroziif aşınma denir. Kimyasal aşınma tek başına ya da diğere aşınma türleri ile beraber görülebilir. Yüzeylerin korunabilmesi için kullanılan filmlerin (tabaka) hasar alması sonucu, malzeme yapısıyla kimyasal afinitesi yüksek olan başta asitler ve oksijen gibi elementler reaksiyona girerek yüzeyde bileşikler yapar. Koroziif aşınma genellikle malzeme yapısına verdiği zarar sebebiyle metal kullanılan endüstrilerde milyarlarca dolarlık zarara neden olmaktadır (Oğuz 1993). Kimyasal korozyon, kaymanın oluştuğı kimyasal ve aşındırıcı bir ortamda meydana gelir. En baskın koroziif ortam oksijendir. Bu nedenle havadaki kimyasal aşınma genellikle oksidatifdir. Korozyon ilk etapta yüzeyde ince bir film oluşturarak malzeme kaybını azaltıcı bir etki yapar. Ancak bunun ardından yüzeye uygulanan kayma gerilmeleri ile birlikte çok fazla malzeme kaybı olur (Bhushan 2013).



Şekil 2.16 Koroziif bir malzeme ile aşınmış yüzey arasındaki etkileşimler (Stachowiak and Batchelor 2013).

Yüzeyde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu yüzeyde öngörülemeden adhesiv aşınmaya neden olmaktadır. Korozyona uğramış malzemede kayma ile oluşabilen (Şekil 2.16) farklı süreçler;

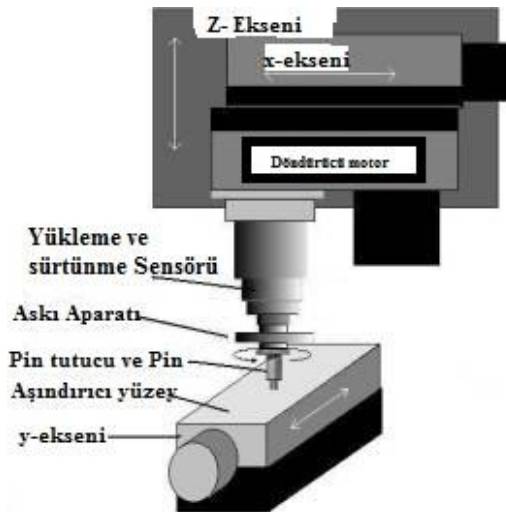


- Yüzeydeki dayanıklı bir yağlayıcı film tabakası, bulunduğu ortamın şartlarında korozyon ve aşınmaya neden olabilir.
- Kısa ömürlü olan zayıf film tabakası, aşınma oranının yüksek olmasından dolayı yıkıma uğrar. Yüzeydeki sürtünme katsayısı yüksek ya da düşük olabilir.
- Yıpranmış yüzey tabakası, koruyucu bir film tabakası ile galvanik çift arasında hızlı bir korozyon meydana gelebilir.
- Korozyon ve aşınma süreçleri her ikisi birlikte malzemeye zarar verebilir (Stachowiak and Batchelor 2013).

## 2.4.7 Deneysel Aşınma Metotları

### 2.4.7.1 Pin On Flat Yöntemi

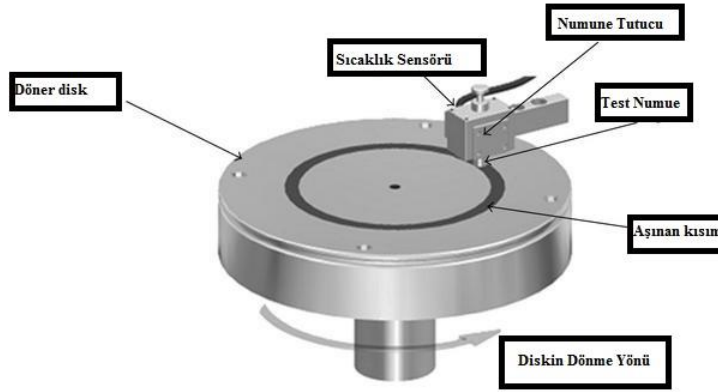
Bu aşındırma yönteminde bir y eksenini boyunca dönen bir pimin numune yüzeyinde doğrusal hareket etmesiyle sürtünme katsayıları hesaplanır. Burada alt tabaka sabit iken numune x eksenini boyunca hareket ettirilerek uç kısımdaki sensör vasıtasıyla sürtünme kuvveti, normal kuvvet, sıcaklık ve zaman gibi faktörler hesaplanır. Burada yük yukarıdan uygulanır (İnt.Kyn.18).



Şekil 2.17 Pin-on-flat aşındırma yönteminin şeması (İnt.Kyn.18).

### 2.4.7.2 Pin On Disk Yöntemi

Pin on flat yönteminden sonra en yaygın olarak kullanılan aşınma yöntemidir. Pin on disk uygulamalarında malzemenin sürtünme ve aşınma özellikleri dahil yüksek sıcaklıktaki atmosfer şartları kontrol altında tutulabilir. Bu yöntem elmas uç kullanılarak kaplamalara yapılan aşındırma testlerinde sıklıkla kullanılır. Ayrıca SEM ile birlikte aşınma özelliklerini takip edebilmek içinde kullanılmaktadır. SEM ile birlikte çizilme testleri ile de kullanılabilir. Tek noktada aşınma yöntemi ile meydana gelen deformasyon ve kırık yüzey analiz edilebilir. Metal seramik ve polimerlerde gibi geniş bir malzeme yelpazesinde kullanılabilir (İnt.Kyn.18).

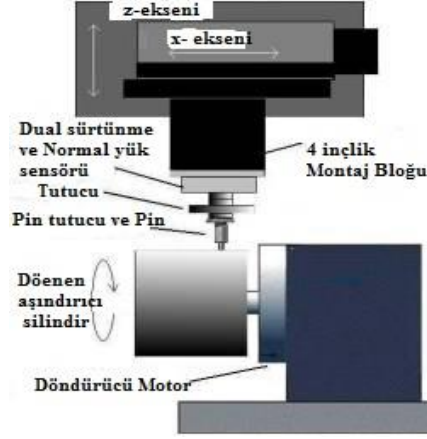


Şekil 2.18 Pin-on-disk çalışma şeması (İnt.Kyn.18).

Cihazın çalışma temeli bir tutucuya bağlanan numunenin bir disk üzerinde aşındırılması sonucudur. Aşındırma esnasında dairesel olarak çapı ayarlanan numuneye aksenal bir sabit yük uygulanır. Uygulanan yükün oluşturduğu kuvvetleri algılayan sensörler vasıtasıyla sürtünme katsayısı gibi pek çok faktör hesaplanabilir (Kennedy and Hashmi 1998).

### 2.4.7.3 Pin On Drum Yöntemi

Bu test, silindirik bir pin üzerinde aşındırıcı kâğıt vasıtasıyla malzeme yüzeyinin aşındırılması temeline dayanır. Bu testin aşınma simülasyonu değirmene benzemektedir (Kennedy and Hashmi 1998).

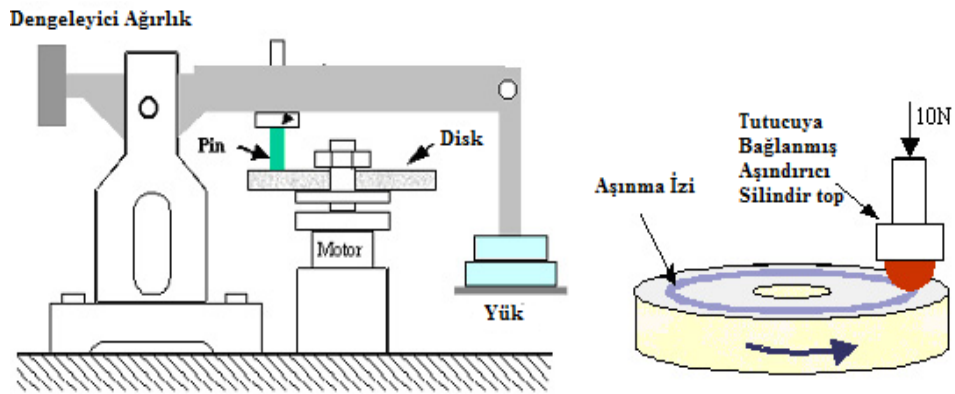


Şekil 2.19 Pin-on-drum çalışma şeması (İnt.Kyn.18).

Aşındırıcı dönen bir silindire yaklaşık 100 N'luk sabit bir yük altında sürtünme kuvveti, sıcaklık, aşınma derinliği gibi malzeme özellikleri ölçülebilir. Bu yöntemin başka bir varyasyonunda tutucu pin'de aksel olarak kendi etrafında dönebilmektedir (İnt.Kyn.18).

#### 2.4.7.4 Ball On Disk Yöntemi

Bu yöntem diğer "pin on" yöntemlerine göre numune dönmekte iken sabitlenmiş bir aşındırıcı ucun, malzeme yüzeyine sabit bir yük altında teması sonucu yüzeydeki sürtünme kuvvetinin hesaplanması temeline dayanır (İnt.Kyn.19).



Şekil 2.20 Ball on disk yönteminin çalışma şeması (İnt.Kyn.19).

Diğer “pin on” yöntemleri ile oldukça benzer olan bu yöntemde tutucu üzerine bağlanan 8 mm çaplı silindirik sert WC/Co indentör vasıtasıyla, yüzeye 10N sabit bir yük uygulanır. Yükün uygulandığı tutucuya aynı zamanda bir loadcell bağlanarak sürtünme kuvveti belirlenir. Malzemeye belirli devir/uzunlukta sürtünme uygulanarak profilometre ile aşınma derinlikleri saptanabilir (İnt.Kyn.19).

### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1 İncelenen Çelikler

Tez çalışması kapsamında incelenen yüksek hız takım çelikleri AISI M35 ve AISI M42 piyasadan sırasıyla 63 mm ve 22 mm çapta silindirik içi dolu malzeme olarak temin edilmiştir. Bu malzemelerden 63 mm'lik silindirik parça su jeti ile ve 22 mm'lik silindir parça ise torna ile işlenerek  $\Phi 20$  mm x 10 mm'lik silindir numune haline getirilmiştir. Her iki çelikten de 10'ar adet numune hazırlanmış ve bu numunelerden 1'er tanesi referans (ham) numune olarak kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerin resimleri, Resim 3.1'de gösterilmiştir.



**Resim 3.1** Hazırlanan numuneler.

Numuneler hazırlandıktan sonra kimyasal bileşimlerinin analizi, Spektral Analiz (XRF) cihazı ile KOSGEB'de yapılmıştır. İncelenen çeliklerin kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1' de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** İncelenen çeliklerin kimyasal bileşimleri.

Çelik (AISI/DIN)	C	Cr	Mo	W	V	Co	Si	Mn	Ni	Fe
M35 / HS 6-5-2-5	0,973	3,94	6,04	6,84	1,89	4,75	0,288	0,279	0,192	74,60
M42 / HS 2-10-1-8	1,16	4,13	11,08	1,49	0,938	7,55	0,566	0,339	0,473	72,08

Çizelge 3.1'den görüldüğü üzere, çeliklerin karbon miktarı birbirine yakın olmakla birlikte, alaşım elementlerinin toplam miktarı bakımından AISI M42'nin AISI M35'e göre daha fazla alaşım elementine (yüzdece) sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca AISI M35'de Mo ve W baskın alaşım elementi iken, AISI M42'de Mo ve Co baskın alaşım elementidir.

### 3.2 Borlama İşlemi

İlk olarak kesilen numunelerin yüzeyleri hassas taşlama işlemi ile parlatılmış ve düzeltilmiştir. Yüzeyleri parlatılmış numuneler kutu borlama işlemi ile borlanmıştır. Bunun için silindirik ve kare profil kutular kullanılmıştır. Resim 3.2'de kutu borlama yönteminde kullanılan kutu yapısı gösterilmiştir.



**Resim 3.2** Silindirik borlama kutusu.

Borlama işleminden önce numunelerin yüzeyleri alkol ile temizlenmiş ve herhangi oksit, yağ kir, nem gibi borlama işlemine etki edebilecek etmenler ortadan kaldırılmıştır. Borlanacak çelikler kutuya yerleştirilmeden önce taban kısmı ticari Ekabor II tozları ile belirli bir ölçekte doldurulmuş ardından doldurulan kısım düzeltilmiş ve üstüne numune yerleştirilmiştir. Numunenin üzerine yine belirli bir ölçekte ticari Ekabor II doldurulmuştur. Daha sonra ise ticari Ekabor II tozunun üzeri deoksidan Ekrit tozu ile kapatılmıştır. Böylece numunelerin dış atmosferle olan ilişkisi

kesilmiştir. Kutunun kapağı da kapatıldıktan sonra ısıtım işlemi geçilmiştir.

Kutular hazırlandıktan sonra, Protherm marka fırın içerisinde 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda ve 2, 4 ve 6 saat sürelerde borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Resim 3.3’de borlama işlemi için kullanılan Protherm marka fırın gösterilmektedir.



**Resim 3.3** Borlama işleminde kullanılan fırın.

Fırın içerisine en fazla üç kutu yerleştirilebildiğinden, numuneler, fırın belirli bir sıcaklığa ayarlandıktan sonra, sırasıyla 2, 4 ve 6 saat tutulduktan sonra fırından alınarak havada soğutulmaya bırakılmıştır. Borlama işlemi öncesi ve sonrası aşınma deneyine tabi tutulmuş numunelerin görünüşü resim 3.4’te gösterilmiştir.



**Resim 3.4** Borlama işlemi öncesi ve sonrası numunelerin görünüşü.

Borlama işlemi sonrası, hem XRD analizi hem de aşınma deneyi öncesi, numunelerin yüzeyinin temizlenmesi gerekmektedir. Borlanan yüzeyde sıcaklığında etkisiyle yüzeyde birikmiş olan ticari Ekabor II tozlarının giderilebilmesi için borlama kutusundan çıkan numunenin kaba temizliği yapıldıktan sonra ultrasonik yüzey temizleme yapılmalıdır. Aksi halde yüzeyde kalan toz partikülleri hem XRD analizde hem de aşınma deneyinde farklı test sonuçlarına neden olur. Ultrasonik temizleme yöntemi, saf su ile doldurulmuş bir haznenin içerisine numune yerleştirildikten sonra ses titreşimleri vasıtasıyla numune yüzeyindeki partiküllerin uzaklaştırılması ile yapılmaktadır. Bu yöntem ile tüm malzemeler minimum 10 dakika temizleme işlemine maruz bırakılmıştır. Resim 3.5’de bu cihazın görüntüsü gösterilmiştir.



**Resim 3.5** Ultrasonik numune temizleme cihazı.

### **3.3 XRD Analizi**

XRD analizi ile borlama işlemi sonucunda çelikler yüzeyinde oluşan bor tabakasındaki bor bileşikleri analiz edilmiştir. Resim 3.6’da AKÜ-TUAM’da (Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi) kullanılan Brucker marka XRD cihazı gösterilmiştir.





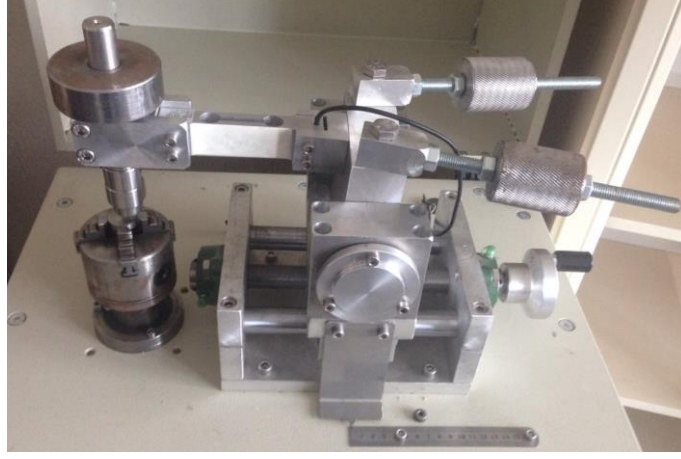
**Resim 3.6** XRD cihazı (Brucker marka).

### **3.4 Aşınma Deneyi**

İncelenen çeliklerin aşınma testleri, Ball-On-Disk aşınma metoduna uygun bir cihazla yapılmıştır. Bu yöntemde, dönen bir yatak üzerine bağlanan numunenin üzerine aşındırıcı bir bilya temas ettirilir. Kullanılan aşındırıcı bilya bir tutucu ile “yük hücresine” (loadcell) bağlanmıştır. Yük hücresi, çizgisel olarak sürtünmeye bağlı numunede oluşan yükü bilgisayara gönderir. Bu bilgiler, özel hazırlanmış bir programda işlenerek sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.

Deney şartları olarak, 10 N yük altında, 0,3 m/s kayma hızını verecek şekilde 378 devir ve maksimum 500 m yol alacak kadar süre kabul edilmiştir. Loadcell ile ölçülen sürtünme kuvveti bilgisayara aktarılarak, bu değerler ile sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.

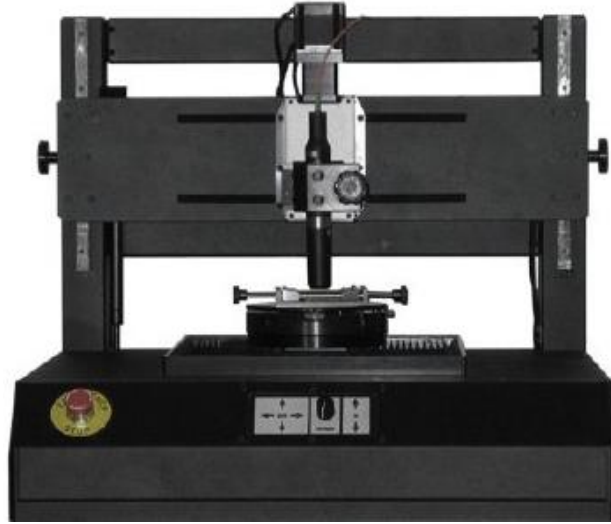
Numune merkezlendikten sonra, aşındırıcı bilye kolu ile numune yüzeyi arasındaki mesafe, yaklaşık 16 mm çapta aşınma izi oluşturacak şekilde ayarlanmıştır. Numunelerin her iki yüzeyi de aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Her aşınma testinden önce aşındırıcı bilyenin yüzeyi ve malzemenin yüzeyi alkol ile temizlenmiş ve bilyenin aşınan kısmı da değiştirilmiştir. Resim 3.7’de kullanılan aşınma cihazı gösterilmiştir.



**Resim 3.7** Aşınma cihazı.

### **3.4.1 Profilometre ile Aşınma İzi Analizi**

Çeliklerin yüzeyindeki aşınma izlerinin analizi, Nanovea ST 400 adlı cihazda yapılmıştır. Aşınma deneyine tabi tutulmuş numunelerin tüm yüzeyleri, bu cihazın tablasına yerleştirilerek lazer ışınıyla taranmıştır. Böylece, Professional 3D adlı bilgisayar programı vasıtasıyla numune yüzeyinin ve aşınma izinin üç boyutlu topografik haritası çıkarılmıştır. Ayrıca, bu cihaz yardımıyla, aşınma izinin hacmi hakkında bilgi edinilmiştir. Kullanılan profilometre cihazı Resim 3.8’de gösterilmiştir.



**Resim 3.8** Profilometre cihazı.

## 3.5 İç Yapı Analizleri

### 3.5.1 Metalografik İncelemeler

Aşınma analizinden sonra numuneler, hassas kesme cihazı ile ortadan ikiye kesilmiş ve metalografik incelemeler için hazırlanmıştır. Kesme sırasında bor yağı içeren soğutucu sıvı numune yüzeyine gönderilerek sürtünme nedeniyle oluşan ısının meydana getirdiği hasar önlenmiştir. Çeliklerin çok sert olması ve yüzeydeki bor tabakasına zarar vermemek için yük kolu ile çok az kuvvet uygulanarak yavaş bir kesim tekniği uygulanmıştır. Kullanılan kesme cihazı resim 3.9'da gösterilmiştir.



**Resim 3.9** Hassas numune kesme cihazı.

Ardında kesilen numunelerdeki kesme sonucu oluşan çapaklar giderildikten sonra metalografik incelemeyi ve elle tutulmasını kolaylaştırmak için sıcak kalıplama cihazı kullanılarak kalıplanmıştır. Sıcak kalıplama cihazı Resim 3.10'da gösterilmiştir.



**Resim 3.10** Sıcak kalıplama cihazı.

Numunelerin metalografik olarak incelenebilmesi için yüzeyinin zımparalama ve parlatma işlemi uygulanması gerekir. Bunun için Gripo 2V cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz Resim 3.11’de gösterilmiştir.



**Resim 3.11** Zımparalama ve parlatma cihazı (Gripo 2V marka).

Zımparalamaya 240’lık zımparalardan başlanmıştır. Hemen ardından 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200’lük zımparalarla ile yaklaşık 240-320 rpm devirde zımparalama işlemi tamamlanmıştır. Her zımparalama kademesinde bir önceki yüzeye dik olacak şekilde ve bir önceki yüzeydeki çizgiler kaybolana kadar işleme devam edilmiştir. Zımparalama işleminin ardından parlatma işlemine geçilmiştir. Bir çuha üzerinde

1 µm'lik alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) solüsyon ile parlatma işlemi yapılmıştır.

Parlatma işleminin ardında % 5 nital çözeltisi ile numune yüzeyleri dağlanmıştır. En uygun mikro yapı görüntüsünün elde edilebilmesi için, deneme yanılma yöntemiyle dağlama süresi olarak, AISI M35 çeliği için 20 saniye, AISI M42 çeliğinde ise 25 saniye seçilmiştir.

Olympus marka optik mikroskop altında, dağlanmış numunelerin (500<sup>x</sup> büyütmelerde) matris ve bor tabakalarının mikroyapıları incelenmiştir. Mikro yapıların incelenmesinde Resim 3.12'de gösterilen Olympus marka metal mikroskobu kullanılmıştır.



**Resim 3.12** Olympus optik mikroskop.

### **3.5.2 SEM ve EDX Analizleri**

SEM ve EDX analizinde LEO 1430 VP model SEM cihazı kullanılmıştır. Borlanmış numunelerin, hem borlama işlemi sonrasında hem de aşınma deneyi sonrasında, SEM analizleri yapılmıştır. Ayrıca, borlama işlemi sonrası yüzeyde oluşan bor tabakasının kalınlığı ölçülmüş ve SEM-EDX analizi ile hem bor kaplama tabakası hem de matris için element analizi yapılmıştır. Borlanmış numunelerin SEM-EDX analizinde, bor kaplama tabakası için çizgisel analiz yapılırken matris için alan taraması analizi yapılmıştır.



**Resim 3.13** SEM ve EDX analiz cihazı.

### **3.6 Mikro Sertlik Ölçüleri**

Borlanmış numunelerin bor kaplama tabakasının sertlikleri Resim 3.14’de gösterilmiş olan mikro sertlik cihazı ile ölçülmüş ve sertlik ölçümleri kaplama yüzey tabakasından başlayarak kaplama boyunca matrise kadar yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri Vickers yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Yük olarak 25 gr ve yükleme süresi olarak da 10 sn seçilmiştir. Sertlik değerleri cihaz üzerinden direkt olarak okunmuştur.



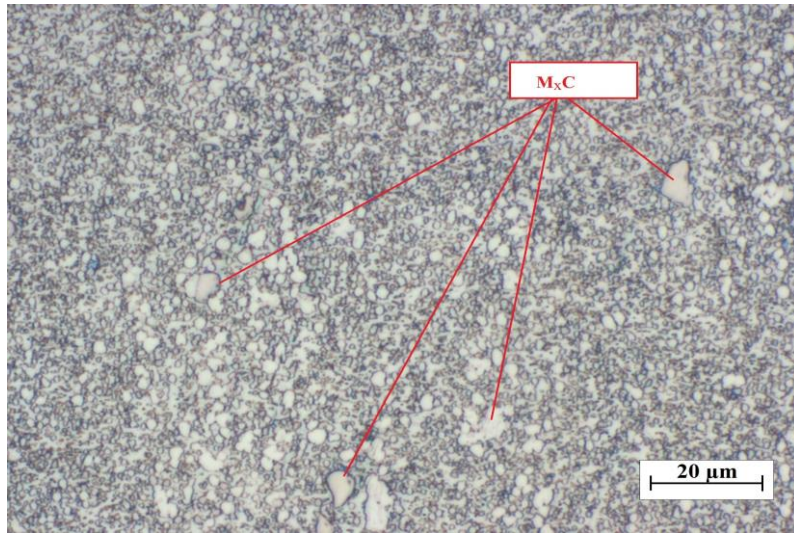
**Resim 3.14** Mikro sertlik cihazı.

## 4. BULGULAR

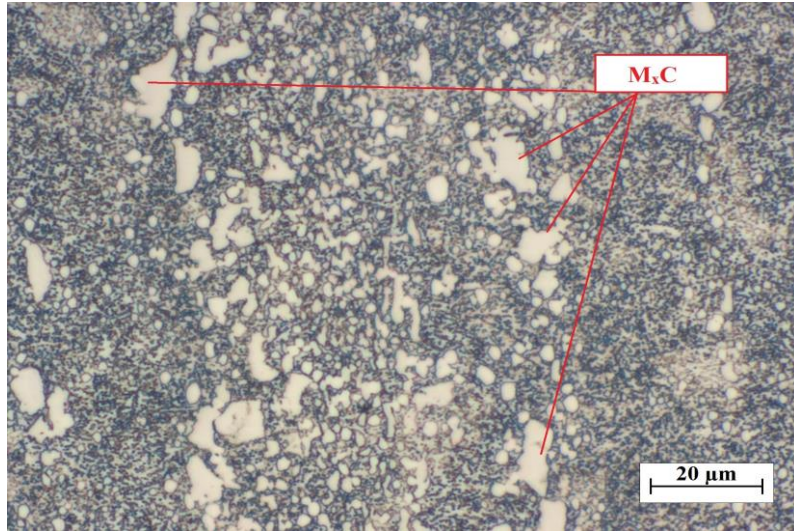
### 4.1 İncelenen Çeliklerin Karakterizasyonu

#### 4.1.1 İçyapı Analizleri

AISI M35 ve AISI M42 yüksek hız takım çeliklerinin %5'lik nital ile dağlanmış numunelerinin içyapısı (optik mikroskop) Şekil 4.1'de verilmiştir.



(a)

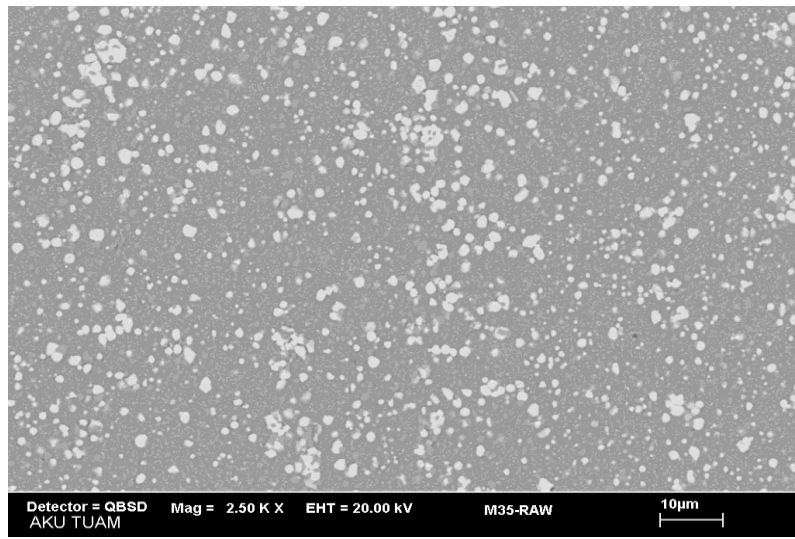


(b)

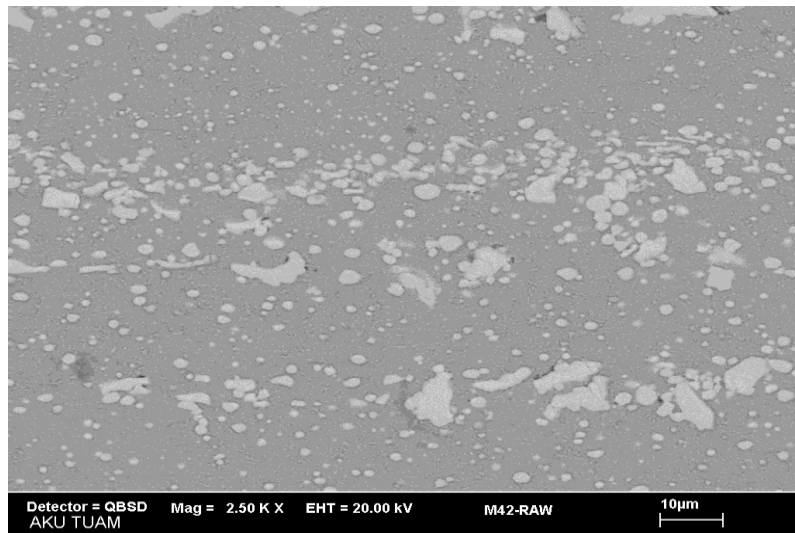
Şekil 4.1 İncelenen çeliklerin içyapıları (a) AISI M35, (b) AISI M42.

Şekil 4.1'den görüldüğü üzere, her iki çelikte de içyapılarda görülen beyaz bölgeler (resimler üzerinde gösterilmiş olan) çeliklerde bulunan alaşım elementlerinin oluşturduğu metal karbür ( $M_xC$ ) yapılarıdır. Ayrıca, bu beyaz bölgelerin etrafı sementit ağı (siyah bölge) ile çevrelenmiştir. İçyapıdaki metal karbür fazı, bu çeliklerin sertliklerini önemli ölçüde arttırmaktadır.

Aşağıdaki şekillerde incelenen çeliklerin dağlanmamış matris SEM içyapı resimleri verilmiştir.



(a)



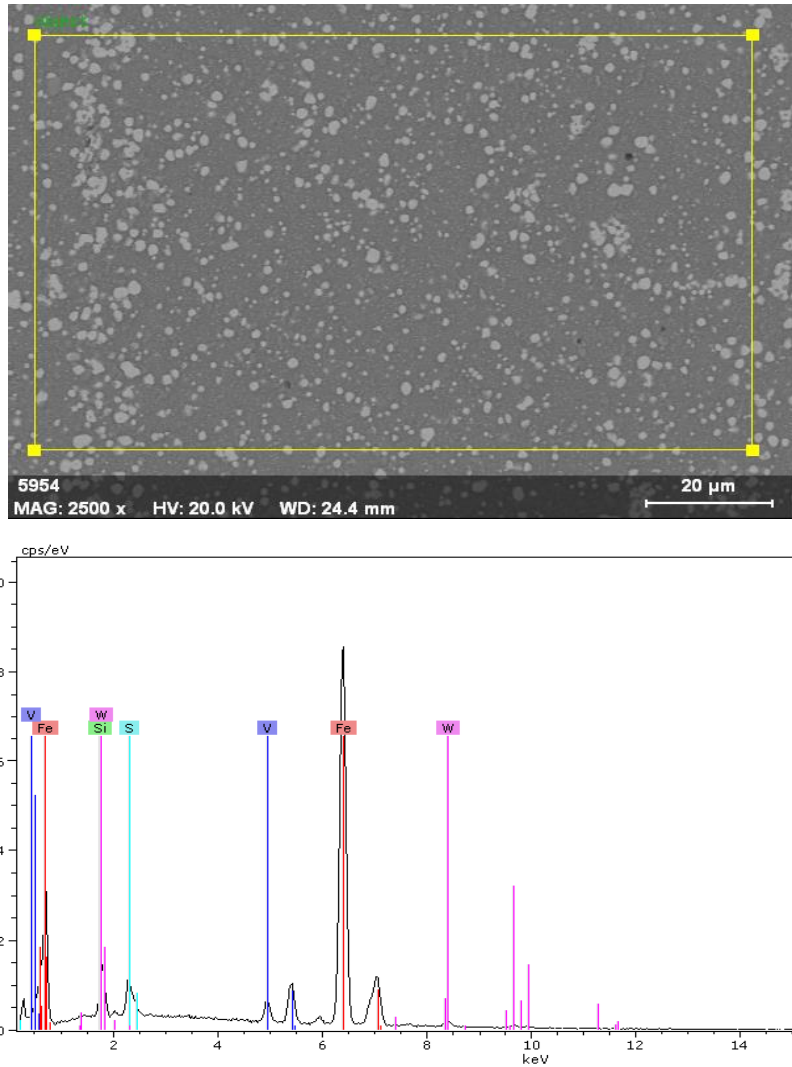
(b)

Şekil 4.2 İncelenen çeliklerin SEM içyapıları (a) AISI M35, (b) AISI M42.

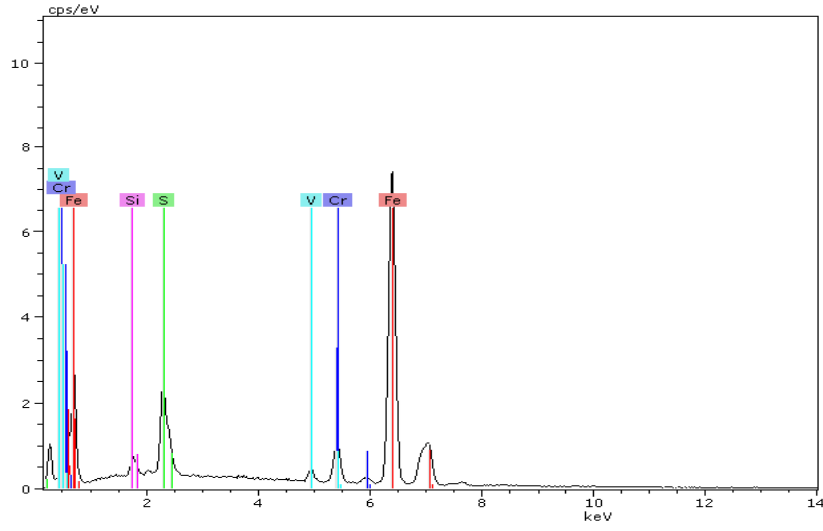
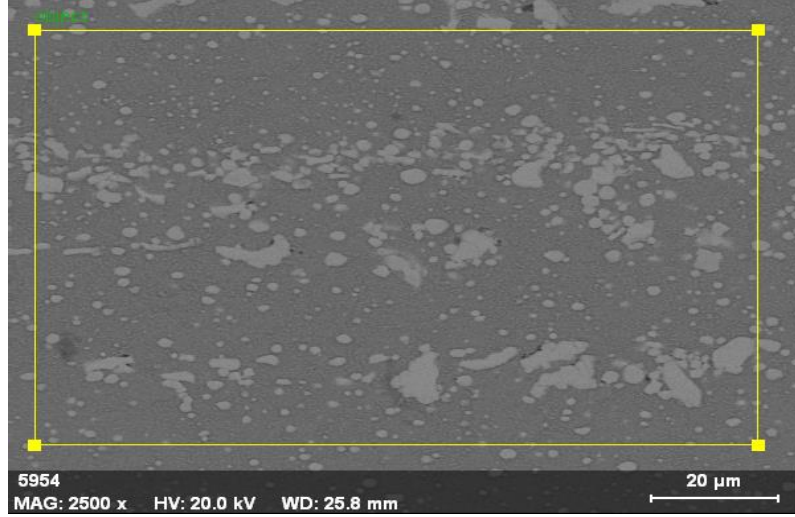


Şekil 4.2'den görüldüğü üzere, incelenen çeliklerdeki alaşım elementlerinin oluşturmuş olduğu metal karbür ( $M_xC$ ) bileşikleri, SEM içyapısında da (optik mikroskop iç yapılarında olduğu gibi) beyaz bölgeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu karbürler, M35 çeliğinde homojen bir dağılım gösterirken, M42 çeliğinde ise daha kaba yapıda ve düzensiz bir dağılım göstermektedir.

Matrisin (dağlanmamış) SEM içyapıları üzerinde, alan EDX analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3 ve 4.4'de sırasıyla M35 ve M42 çeliğinin EDX analizi ve analizin yapıldığı bölge gösterilmiştir.



Şekil 4.3 AISI M35 çeliğinin EDX analizi.

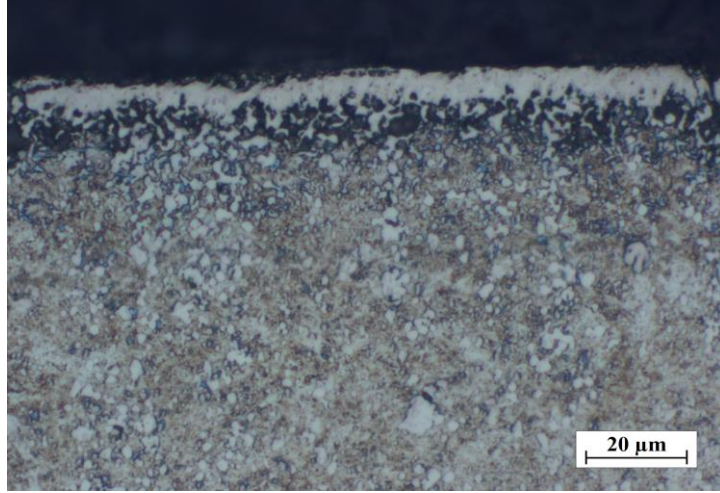


**Şekil 4.4** AISI M42 çeliğinin EDX analizi.

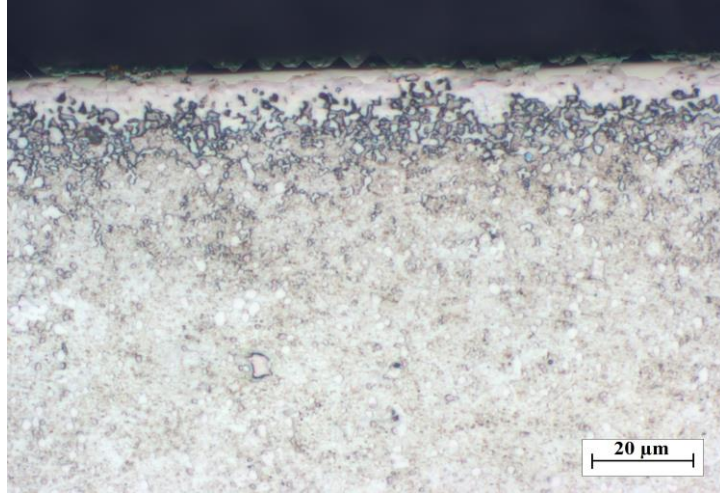
Şekil 4.3 ve 4.4’de yer alan SEM-EDX sonuçlarına bakıldığında, incelenen çeliklerin kimyasal bileşiminde baskın olarak bulunan alaşım elementlerinin varlığı görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur.

İncelenen çeliklere uygulanan borlama ısıl işlemi neticesinde oluşan bor tabakaları, optik mikroskop altında incelenmiş ve bu tabakaların dağlanmış içyapıları sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

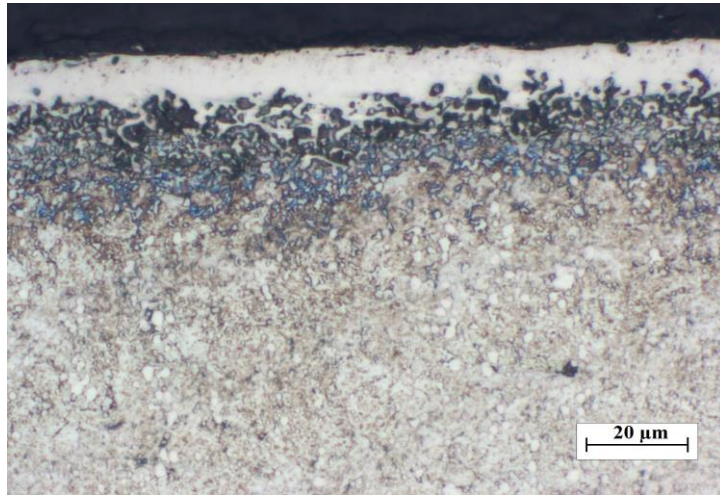
850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı Şekil 4.5’de verilmiştir.



(a)



(b)

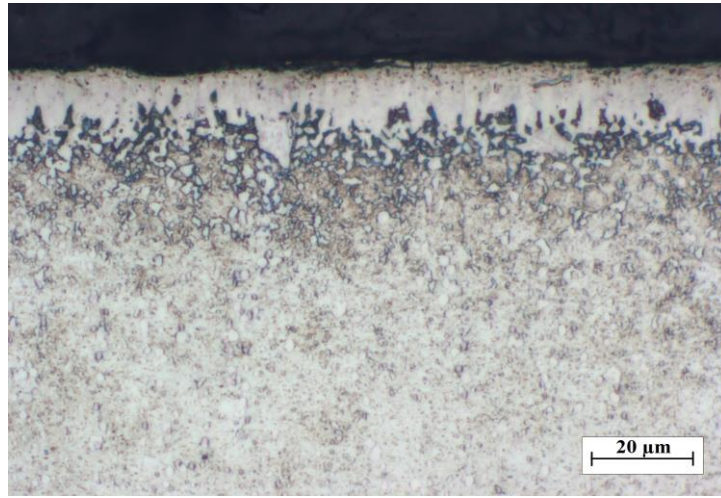


(c)

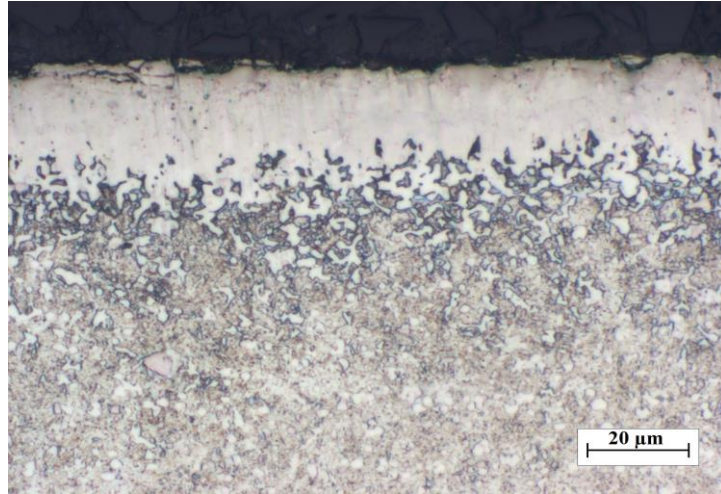
**Şekil 4.5** 850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Şekil 4.5'den görüldüğü üzere, bor tabakası ile matris net bir şekilde ayrılmaktadır. Bor tabakası ile matris arasında yer alan geçiş bölgesinde, dağlama süresine bağlı olarak (aşırı dağlanmış) siyah bölgeler oluşmuştur. Ayrıca bu resimlerde, borlama süresinin artmasına bağlı olarak kaplama kalınlığının arttığı da görülmektedir. İçyapıdaki siyah noktalar ise dağlama hatalarıdır.

900 °C'de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı Şekil 4.6'da verilmiştir.

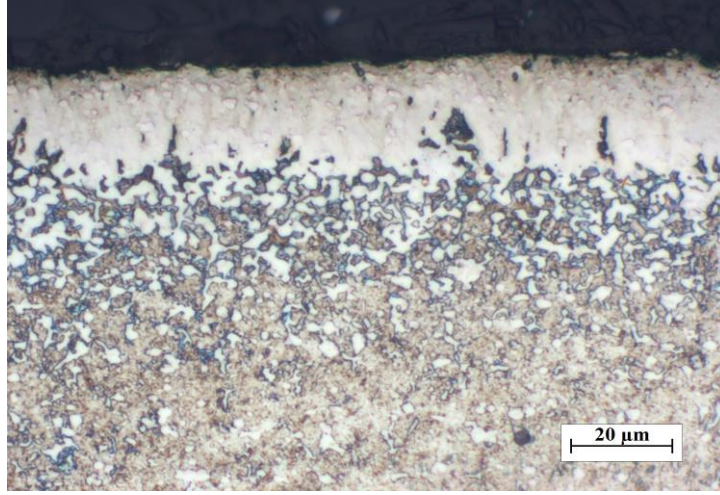


(a)



(b)

**Şekil 4.6** 900 °C'de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

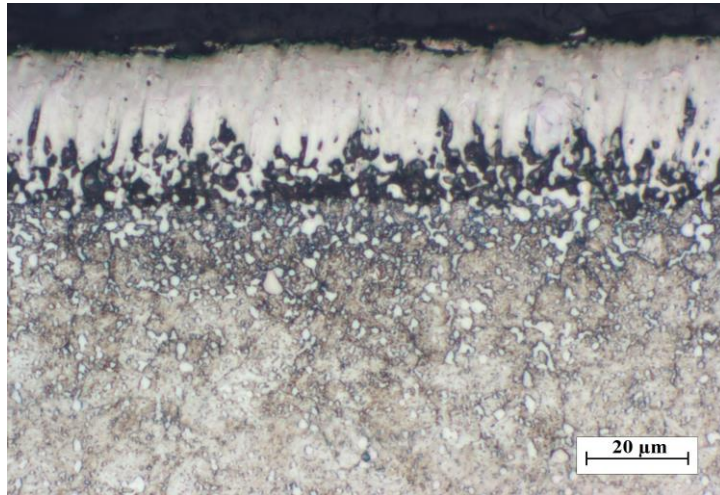


(c)

**Şekil 4.6** (Devam) 900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

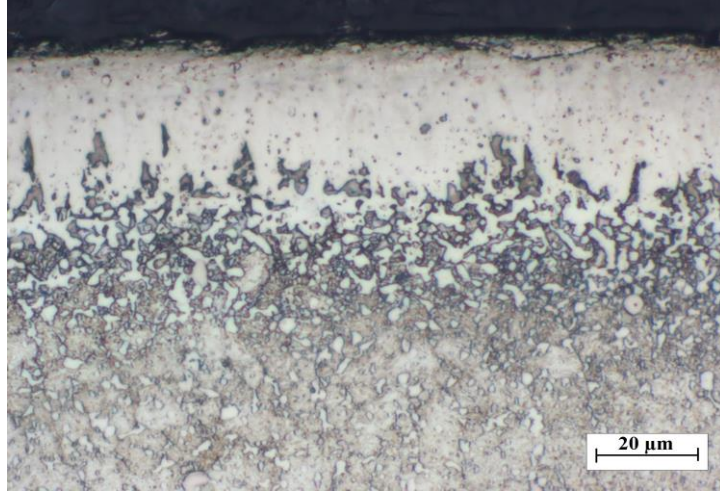
Şekil 4.6’da, bor tabakası ile matris ve bu iki fazın arasındaki geçiş bölgesi belirgin bir şekilde ayırt edilmektedir. Ayrıca, borlama süresinin artmasına bağlı olarak kaplama kalınlığının arttığı da görülmektedir. Aynı çeliğin tabaka kalınlıklarında, 850 °C sıcaklığındaki borlama işlemine göre belirgin bir artış gözlenmiştir. İçyapıdaki siyah noktalar ise dağlama hatalarıdır.

950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı Şekil 4.7’de verilmiştir.

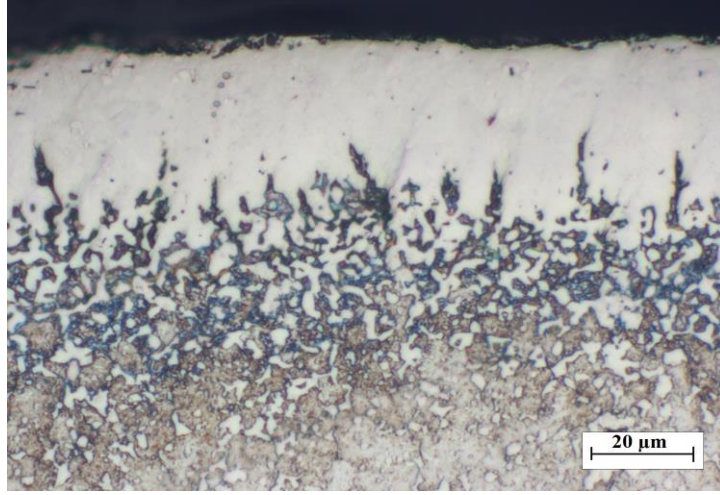


(a)

**Şekil 4.7** 950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.



(b)

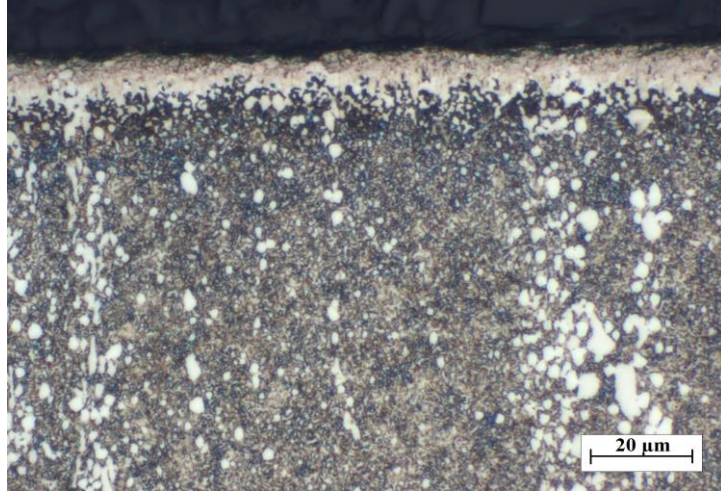


(c)

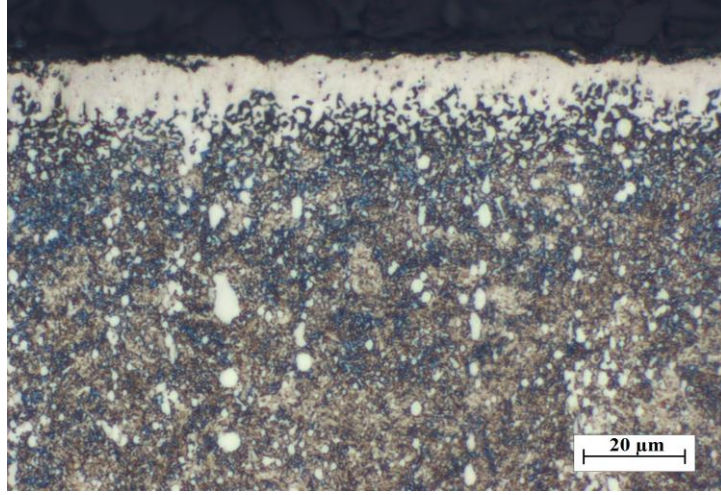
**Şekil 4.7** (Devam) 950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Şekil 4.7’de, matris ile bor tabakası aynı büyütme için daha belirgin bir şekilde ayrılmakta ve borlama süresinin artmasına bağlı olarak kaplama kalınlığının arttığı görülmektedir. AISI M35 çeliği için, diğer iki borlama sıcaklığı ile kıyaslandığında, en yüksek tabaka kalınlığına bu sıcaklıkta erişilmiştir. İçyapıdaki siyah noktalar ise dağlama hatalarıdır.

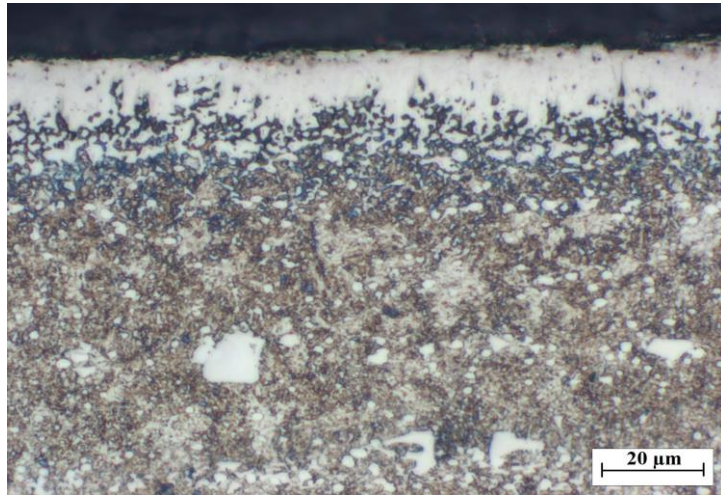
850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı Şekil 4.8’de verilmiştir.



(a)



(b)

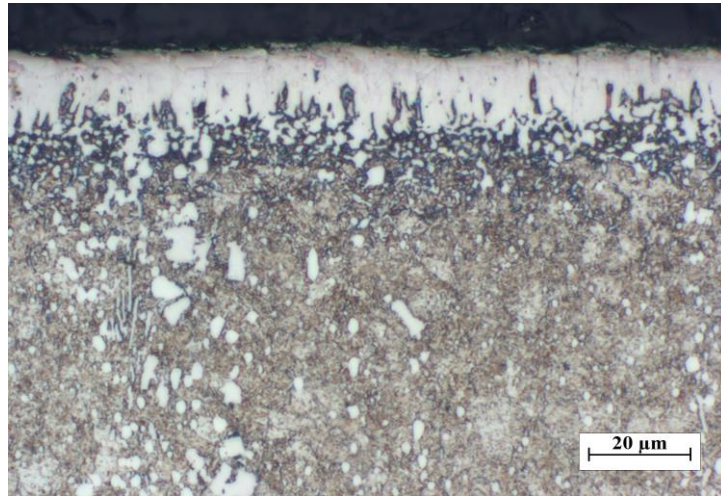


(c)

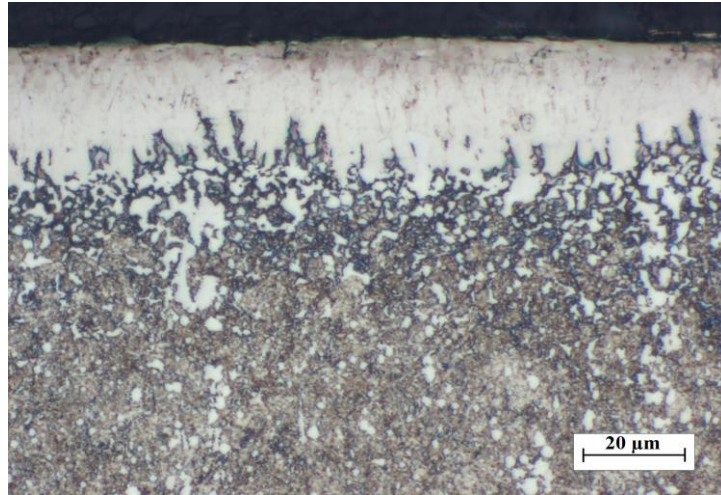
**Şekil 4.8** 850 °C'de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Şekil 4.8'den görüldüğü üzere, bor tabakası ile matris net bir şekilde ayrılmaktadır. Bor tabakası ile matris arasında yer alan geçiş bölgesinde, özellikle 2 ve 4 saat borlanan numunelerde, dağlama süresine bağlı olarak (aşırı dağlanmış) siyah bölgeler oluşmuştur. Borlama süresinin artmasıyla kaplama kalınlığı da artmıştır. İçyapıdaki siyah noktalar ise dağlama hatalarıdır.

900 °C'de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı Şekil 4.9'da verilmiştir.



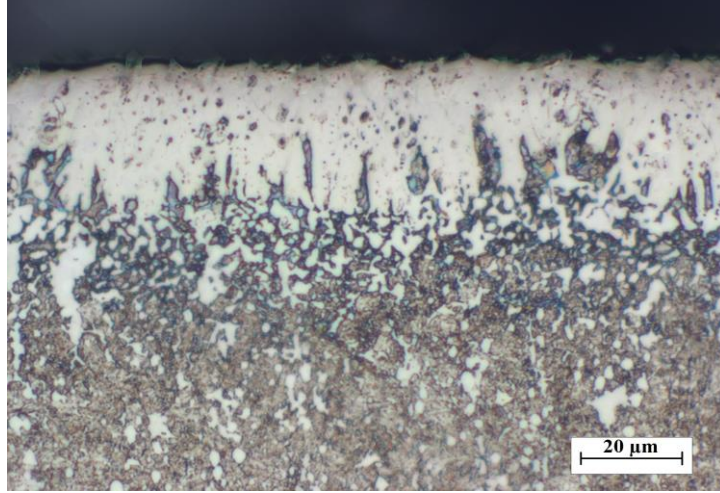
(a)



(b)

Şekil 4.9 900 °C'de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.



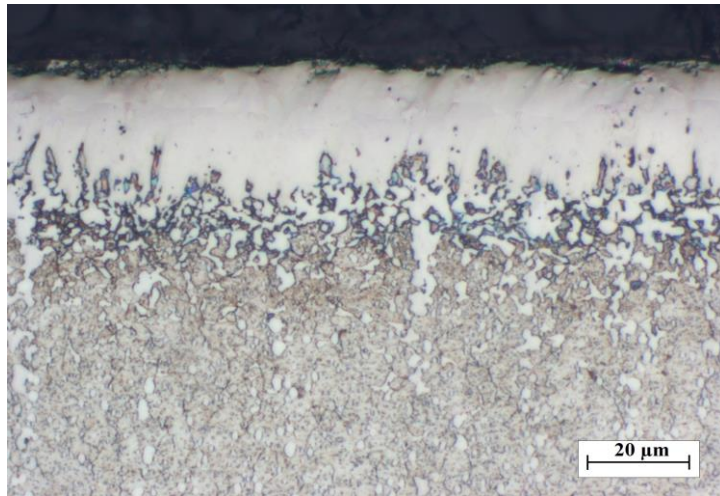


(c)

**Şekil 4.9** (Devam) 900 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

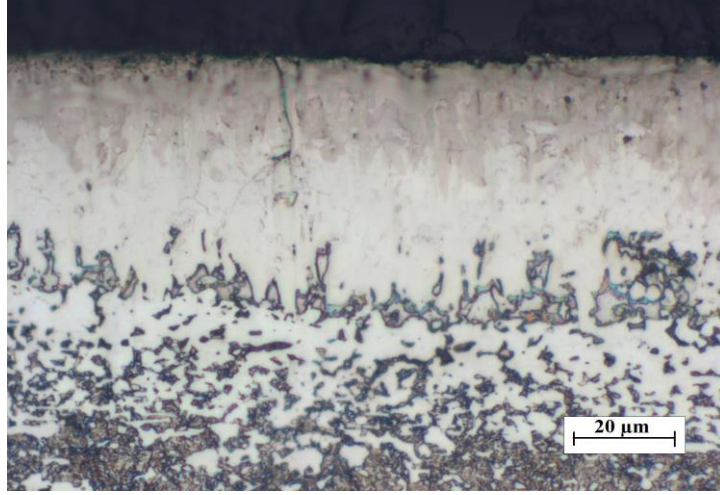
Şekil 4.9’da, bor tabakası ile matrisin yanı sıra bu ikisinin arasındaki geçiş bölgesi de net bir şekilde ayrılmaktadır. Borlama süresinin artmasına bağlı olarak kaplama kalınlığının arttığı da görülmektedir. Aynı çelik için, 850 °C sıcaklığında yapılan borlama işlemine göre tabaka kalınlıklarında belirgin bir artış gözlenmiştir. İçyapıdaki siyah noktalar ise dağlama hatalarıdır.

950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı Şekil 4.10’da verilmiştir.

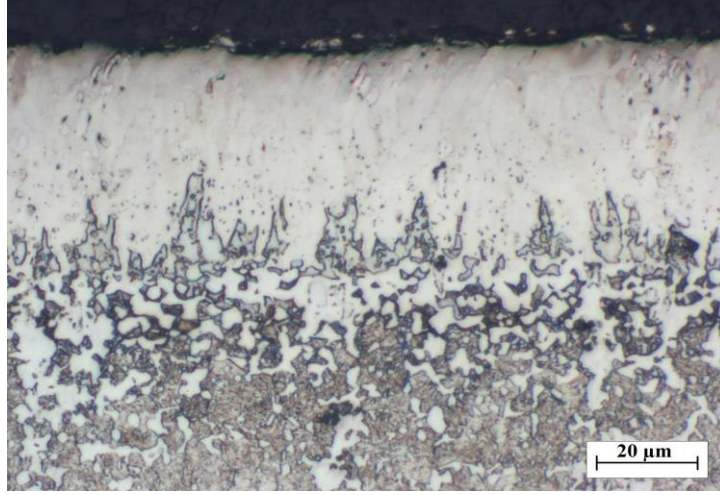


(a)

**Şekil 4.10** 950°C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.



(b)



(c)

**Şekil 4.10** (Devam) 950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının içyapısı (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

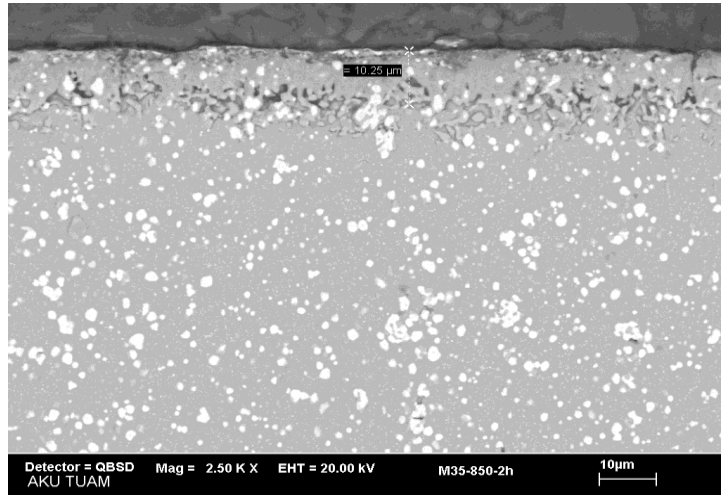
Şekil 4.10’den görüldüğü üzere, aynı büyütme için bor tabakası ile matris net bir şekilde ayrılırken, geçiş bölgesi de daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca, bor tabakasında mevcut fazlar içinde oluşan kontrast daha detaylı bir şekilde gözlenmektedir. Bu durum özellikle 4 saat süreyle borlanmış numunede daha belirgindir. Borlama süresinin artmasına bağlı olarak kaplama kalınlığı da artmaktadır ve AISI M42 çeliği için en yüksek tabaka kalınlığına, tüm sıcaklıklar içinde, bu sıcaklıkta erişilmiştir. İçyapıdaki siyah noktalar ise dağlama hatalarıdır.

Genel olarak Şekil 4.5-4.10 arasındaki içyapı görüntülerine bakıldığında, incelenen çelikler için bor tabakaları net bir şekilde ayrılmakta ve borlama süresi ve sıcaklığının

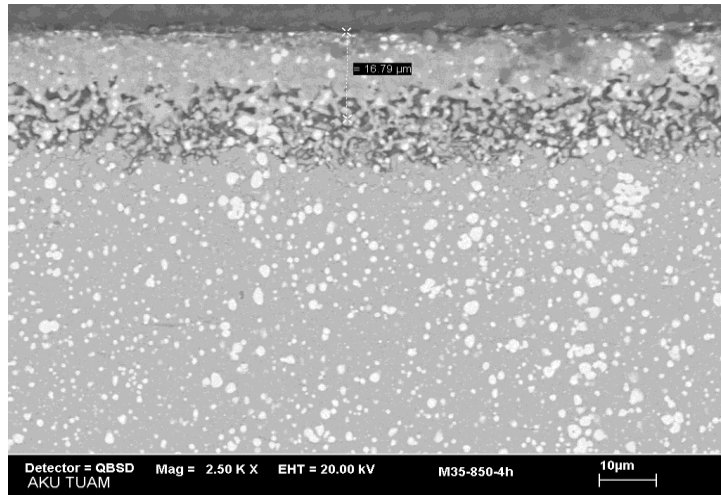
artmasına bağlı olarak, bor tabaka kalınlığı da artmaktadır.

İncelenen eliklerin bor tabakalarının SEM içyapı resimleri sırasıyla aşağıdaki Şekillerde verilmiştir.

850 C’de borlanmış AISI M35 eliğinin bor tabakasının SEM iyapı resimleri aşağıdaki Şekilde verilmiştir.

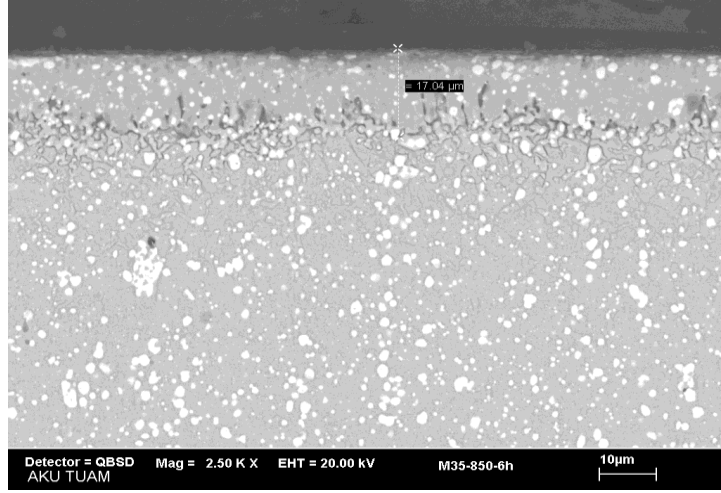


(a)



(b)

**Şekil 4.11** 850 C’de borlanmış AISI M35 eliğinin bor tabakasının SEM iyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

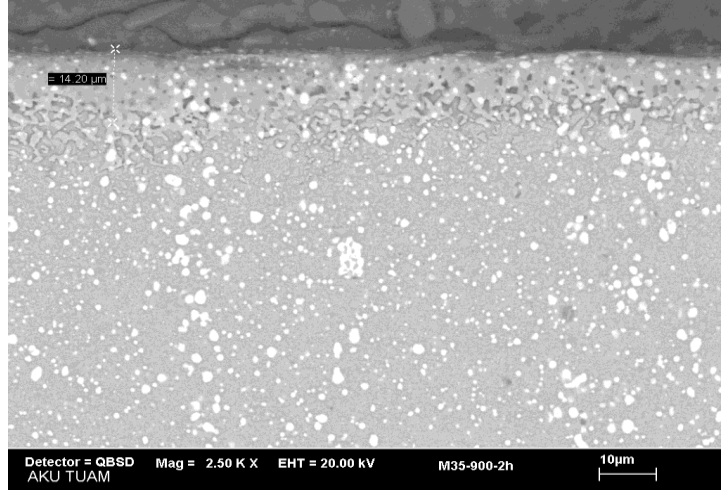


(c)

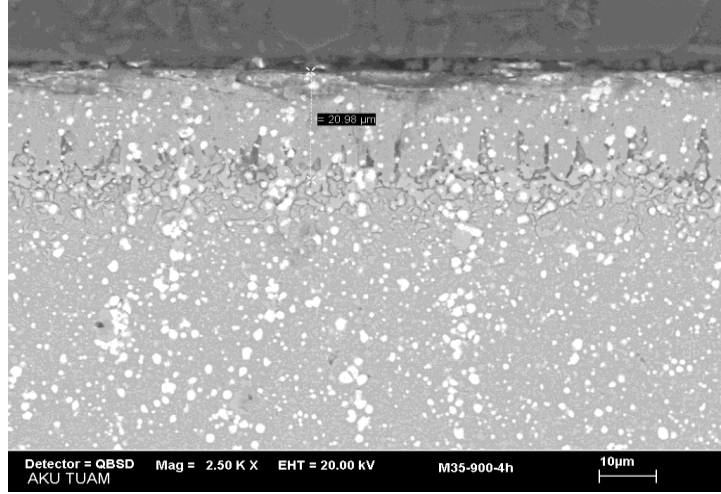
**Şekil 4.11** (Devam) 850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Şekil 4.11’den görüldüğü üzere, bor tabakası ile matrisin ayrımı net bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca içyapı resimlerinin üzerinden alınmış olan bor tabaka kalınlığı ölçümleri de bu resimlerde gösterilmiştir. İçyapılarda görülen beyaz bölgeler metal karbür ( $M_xC$ ) yapılarıdır. Bu yapılar bor tabakasında da rastlanmıştır. Ayrıca, borlama süresinin artmasına bağlı olarak bor tabakası kalınlığının arttığı da görülmektedir.

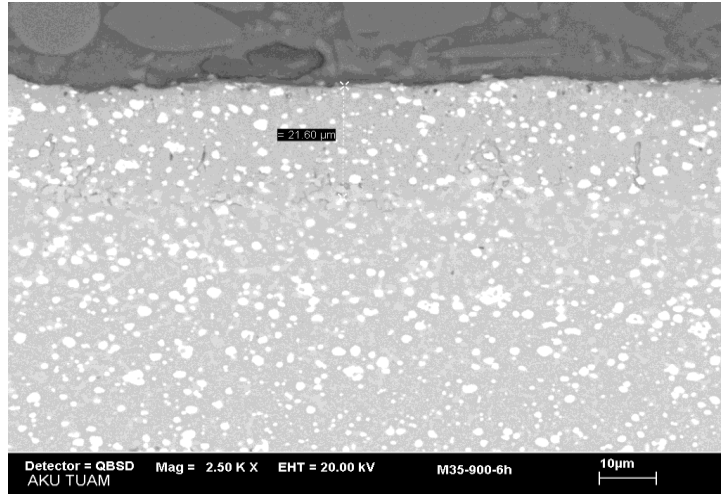
900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapı resimleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



(a)



(b)

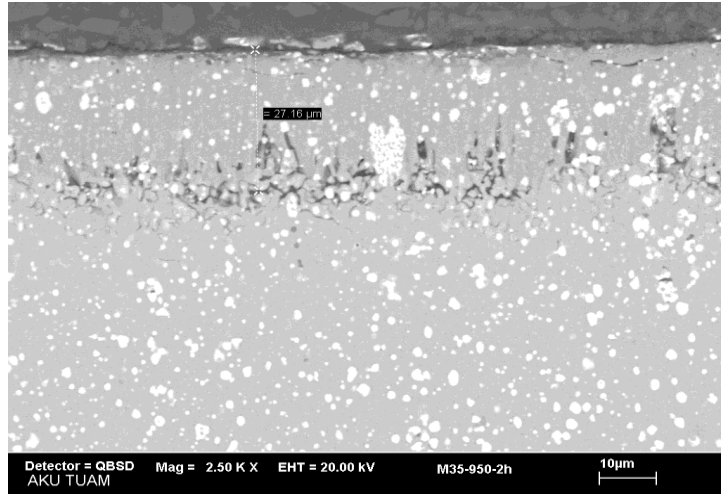


(c)

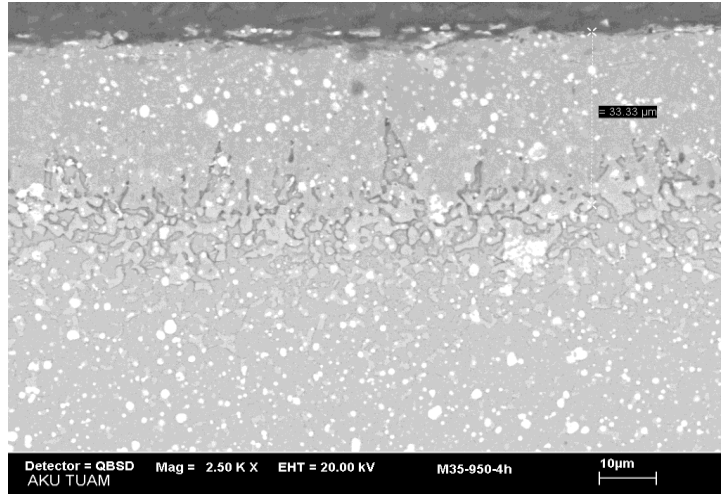
**Şekil 4.12** 900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Şekil 4.12’de, bor tabakası ile matris net bir şekilde ayrılırken, içyapılarda metal karbür ( $M_xC$ ) yapıları beyaz bölgeler olarak görülmektedir. Borlama süresi arttıkça bor tabaka kalınlığı da artmaktadır. Ayrıca, 850 °C’de borlanmış çeliklere göre bor tabaka kalınlıklarında artış görülmüştür.

950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapı resimleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.

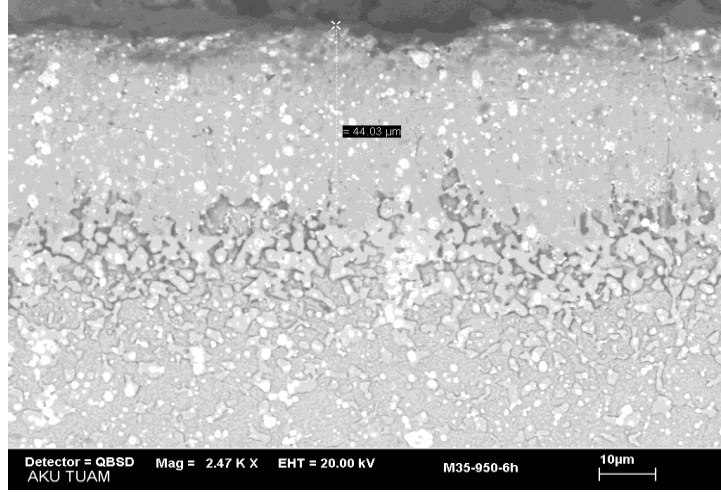


(a)



(b)

Şekil 4.13 950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

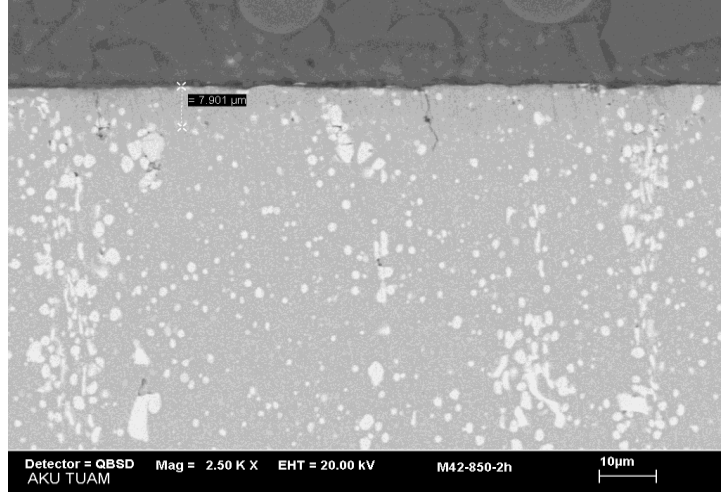


(c)

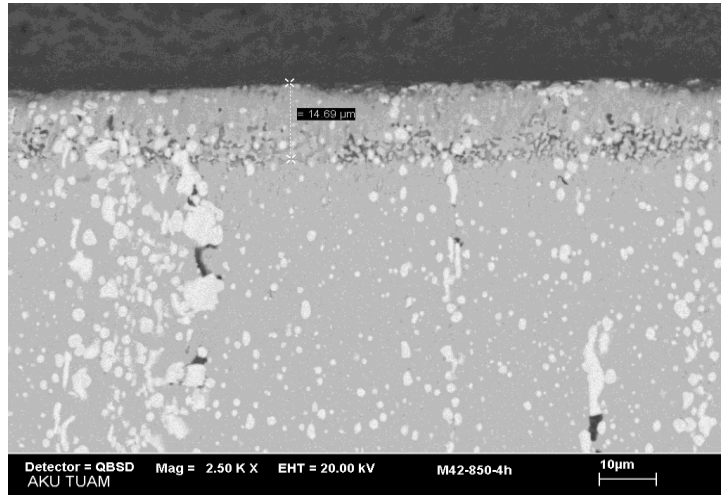
**Şekil 4.13** (Devam) 950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Şekil 4.13’de verilen içyapı görüntülerine bakıldığında, aynı büyütme için bor tabakası ile matris daha net bir şekilde ayrılmaktadır. İçyapılarda görülen ve bor tabakasında da devam eden beyaz bölgeler metal karbür ( $M_xC$ ) yapılarıdır. borlama süresinin artmasına bağlı olarak bor tabakası kalınlığının arttığı görülmektedir. Ayrıca, AISI M35 çeliği için en yüksek tabaka kalınlıkları (difüzyonun da etkisiyle) bu sıcaklıkta gözlemlenmiştir.

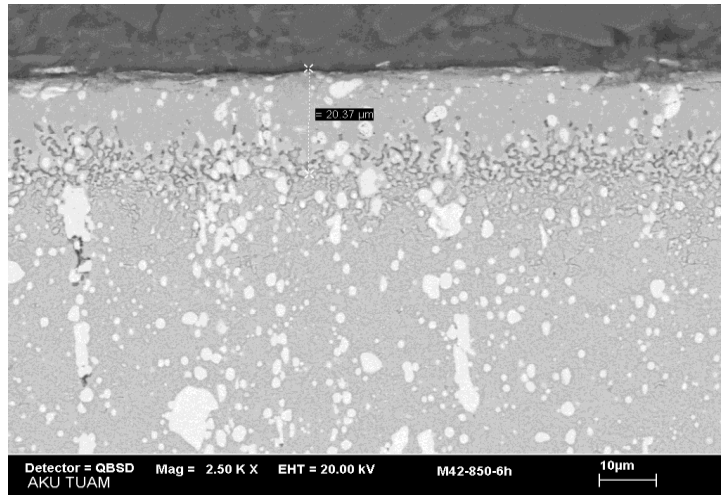
850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapı resimleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



(a)



(b)



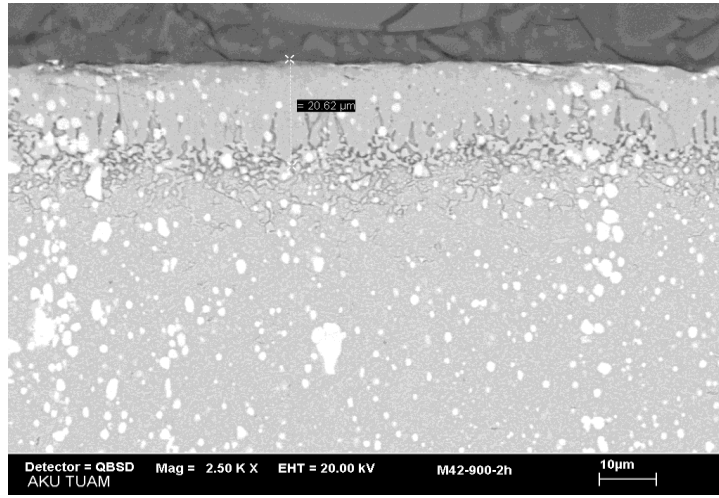
(c)

**Şekil 4.14** 850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

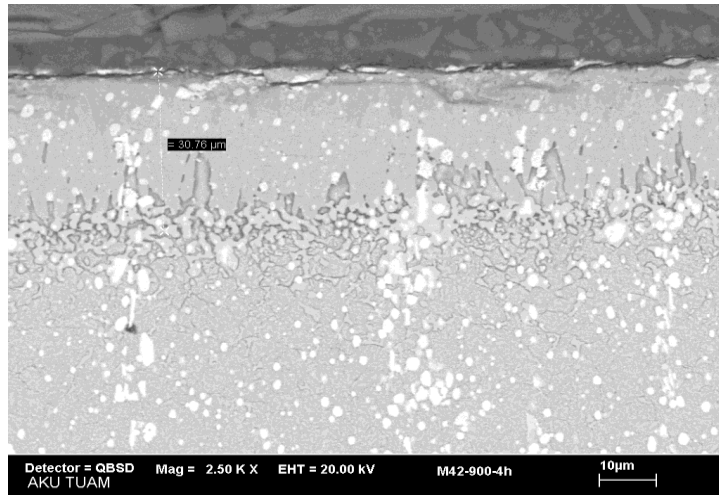


Şekil 4.14'den görüldüğü üzere, bor tabakası ile matrisin ayrımı net bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca SEM cihazıyla yapılan bor tabaka kalınlığı ölçümleri de bu resimlerde gösterilmiştir. İyapılarda görülen beyaz bölgeler metal karbür ( $M_xC$ ) yapılarıdır. Bu yapılar bor tabakasında da rastlanmıştır. Ayrıca, borlama süresinin artmasına bağlı olarak bor tabakası kalınlığı da artmaktadır.

900 °C'de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapı resimleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.

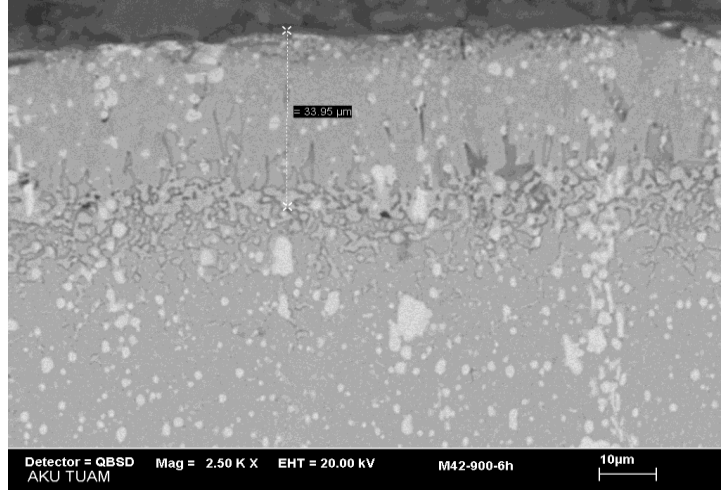


(a)



(b)

Şekil 4.15 900 °C'de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

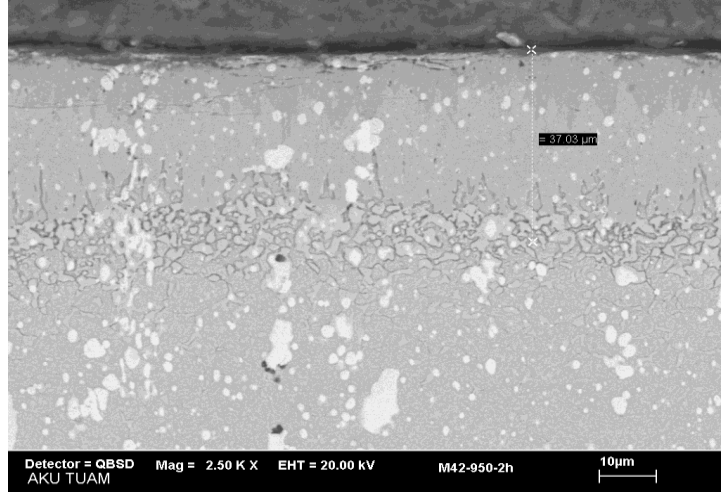


(c)

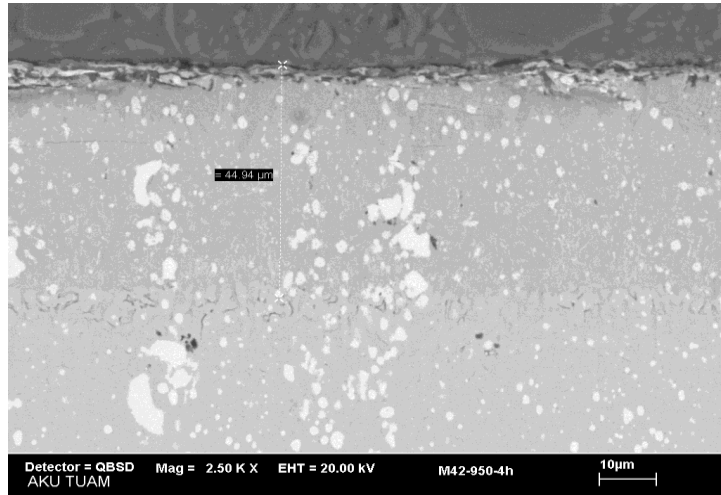
**Şekil 4.15** (Devam) 900 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Şekil 4.15’de, bor tabakası net bir şekilde ayrılırken, ölçülen bor tabaka kalınlıklarına göre borlama süresinin artmasına bağlı olarak bor tabakası kalınlığının arttığı görülmektedir. İçyapılardaki beyaz bölgeler (bor tabakasında da rastlanan) metal karbür ( $M_xC$ ) yapılarıdır. 850 °C’de borlanmış numunelere göre tabaka kalınlıklarında artış görülmüştür.

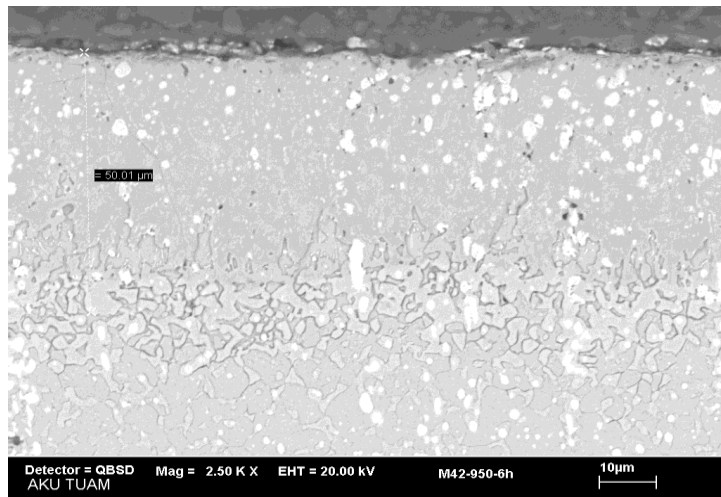
950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapı resimleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.16** 950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının SEM içyapıları (a) 2h, (b) 4h, (c) 6h.

Şekil 4.16'daki içyapı resimlerinden görüldüğü üzere, bor tabakası ile matris net bir şekilde ayrılmakta ve borlama süresinin artmasına bağlı olarak bor tabakası kalınlığının arttığı görülmektedir. İçyapılarda görülen beyaz bölgeler (bor tabakasında da rastlanan) metal karbür ( $M_xC$ ) yapılarıdır. AISI M42 çeliği için en yüksek tabaka kalınlığı, bu sıcaklıkta gözlenmiştir.

Genel olarak Şekil 4.11-4.16 arasındaki SEM görüntülerine bakıldığında, her iki çelik içinde bor tabakası net bir şekilde ayrılmış ve borlama süresi ve sıcaklığının artmasına bağlı olarak bor tabaka kalınlığı da artmıştır.

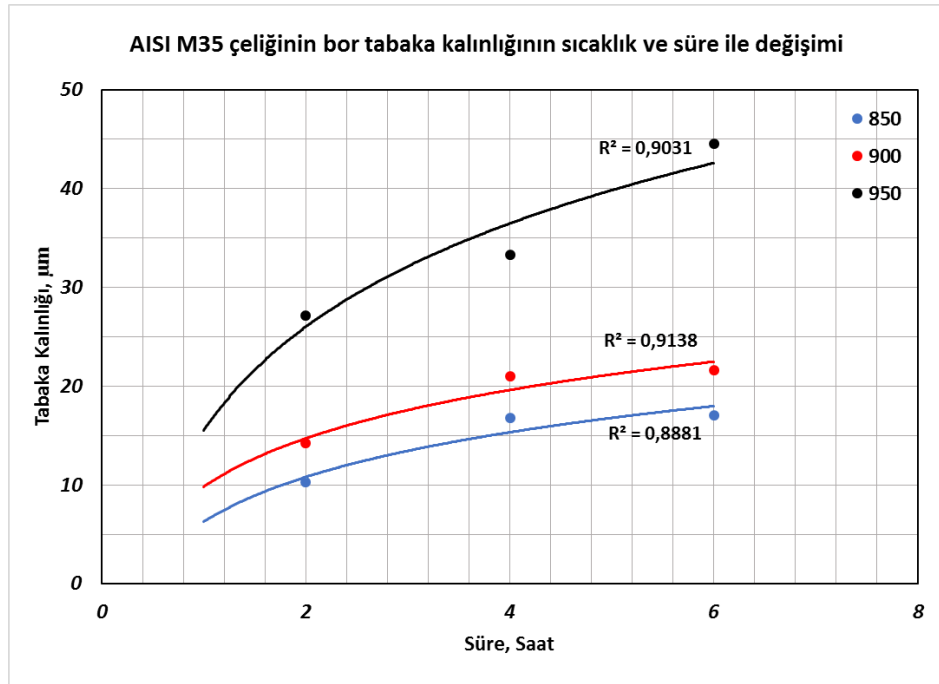
Borlanmış AISI M35 ve AISI M42 çeliklerinin SEM içyapı analizlerinden elde edilen bor tabakası kalınlıkları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

**Çizelge 4.1** Borlanmış AISI M35 ve M42 çeliklerinin bor tabakası kalınlıkları.

Çelik	Borlama İşlemi		Bor Tabakası Kalınlıkları ( $\mu\text{m}$ )
	Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	Süre (Saat)	
AISI M35	850	2	10
		4	17
		6	17
	900	2	21
		4	22
		6	27
	950	2	33
		4	44
		6	45
AISI M42	850	2	8
		4	14
		6	20
	900	2	20
		4	31
		6	34
	950	2	37
		4	45
		6	50

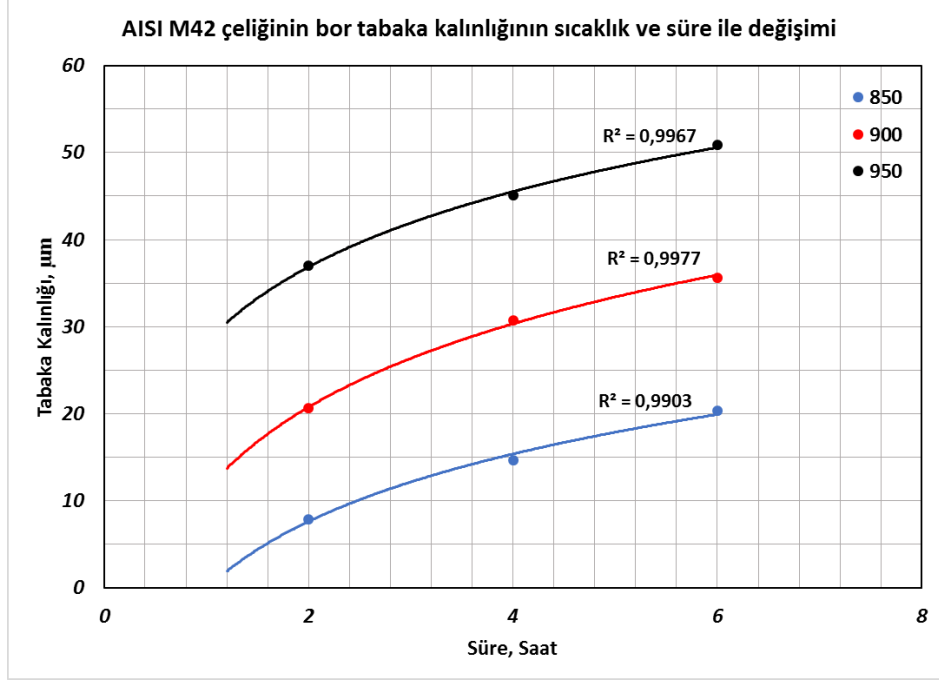
Çizelge 4.1’den görüldüğü üzere, borlama ısıl işlemi sonucu elde edilen bor tabakasının kalınlığı AISI M35 çeliği için 10-45  $\mu\text{m}$  arasında değişirken, AISI M42 çeliği için ise 8-50  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Dolayısıyla, her iki çelikte de aynı borlama işlemi için nispeten birbirine yakın bor tabaka kalınlığı elde edilmiştir.

Aşağıdaki grafikte borlanmış AISI M35 ve AISI M42 çeliklerinin bor tabaka kalınlıklarının borlama sıcaklığı ve süresi ile değişimi verilmiştir.



(a)

**Şekil 4.17** İncelenen çeliklerinin tabaka kalınlıklarının sıcaklık ve süre ile değişimi (a) AISI M35, (b) AISI M42.

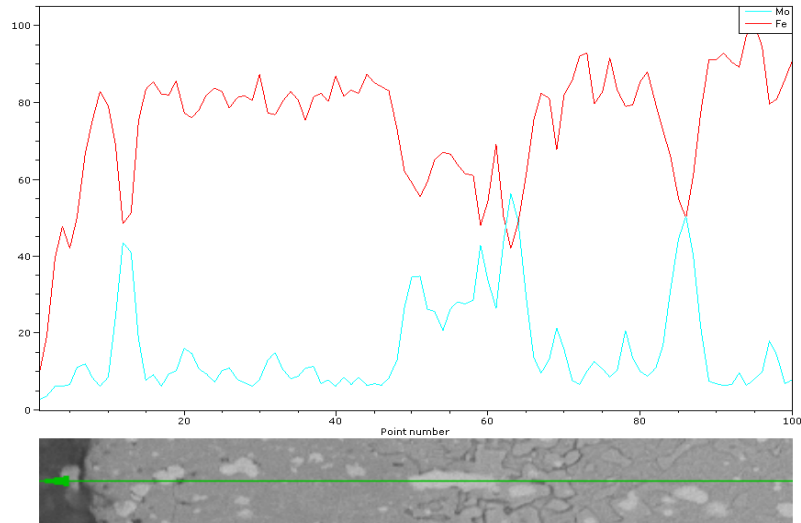
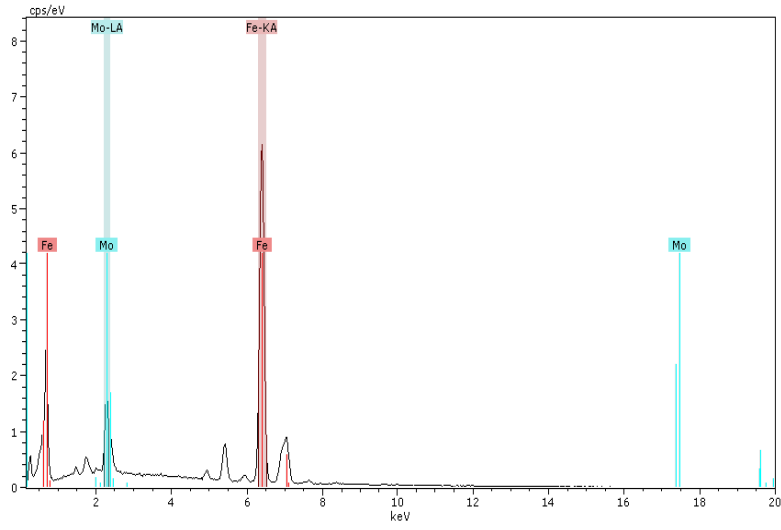
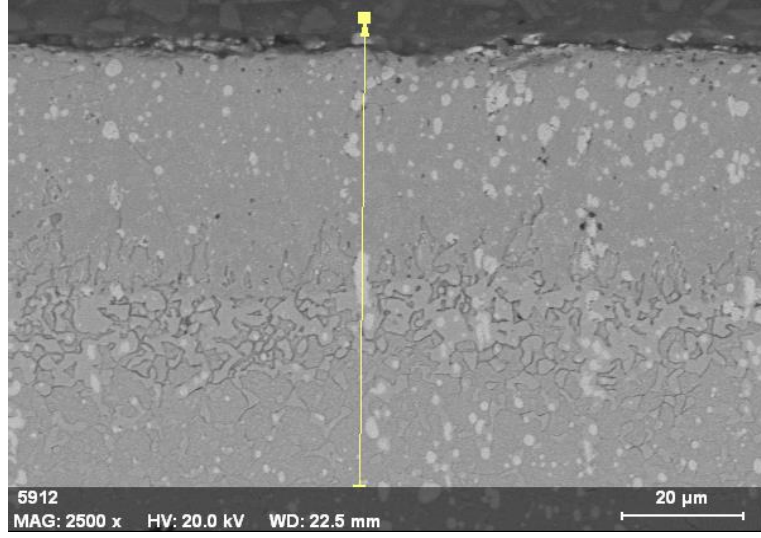


(b)

**Şekil 4.17** (Devam) İncelenen çeliklerinin tabaka kalınlıklarının sıcaklık ve süre ile değişimi (a) AISI M35, (b) AISI M42.

Şekil 4.17'den görüldüğü üzere, incelenen çeliklerin bor tabaka kalınlıkları artan borlama sıcaklığı ve süresi ile birlikte artmaktadır. Ayrıca, borlama ısıl işlemi bir difüzyon işlemi olduğundan, bor tabaka kalınlıkları difüzyonun ilk aşamalarında hızla artarken, daha sonra ise tabaka kalınlıklarındaki artış hızı (herhangi bir borlama sıcaklığı için) azalmaktadır. Benzer durum tüm sıcaklıklarda gözlenmektedir.

950 °C'de 6 saat süreyle borlanmış olan M42 çeliğinin bor tabakasının (dağlanmamış) SEM içyapısı üzerinde gerçekleştirilmiş olan çizgisel EDX analizi, analizin yapıldığı çizgisel bölge ve bu çizgi üzerindeki alaşım elementlerinin dağılımı (örnek olarak) Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18 950 °C'de 6 saat süreyle borlanmış AISI M42 çeliğinin SEM-EDX analizi (örnek).

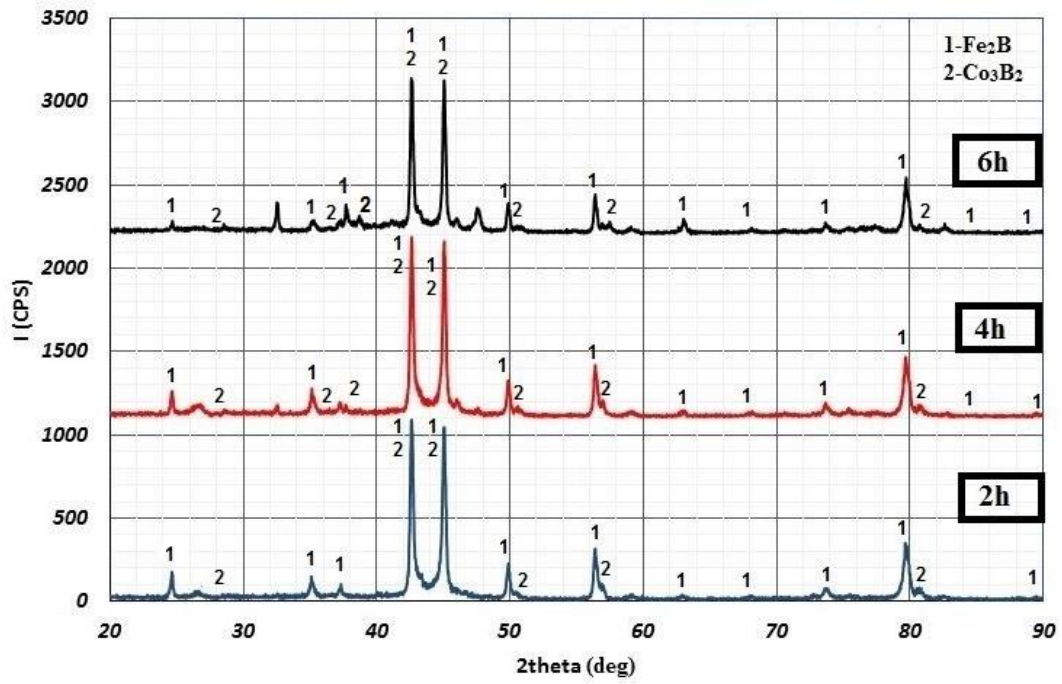
Şekil 4.18'den görüldüğü üzere, 950 °C'de 6 saat süreyle borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasında rastgele alınmış bir çizgi üzerinde SEM-EDX analizi yapılmış ve bu çizgi boyunca alaşım elementlerinin dağılımı verilmiştir. Bu dağılıma bakıldığında, bu analiz çizgisi boyunca, ana element olan demir (Fe) elementinin yanı sıra söz konusu çeliğin bileşiminde baskın olarak bulunan molibden (Mo) elementinin de varlığı söz konusudur. Analiz çizgisinin kesmiş olduğu beyaz bölgeler molibden elementine, diğer kısımlar ise demir elementine işaret etmektedir. Bu durumda, AISI M42 çeliğinin bor tabakasında, gri bölgelerde muhtemel demir bor bileşiklerinden ve beyaz bölgelerde ise molibdenin karbonlu bileşiklerinden (çünkü bu beyaz bölgeler matriste de devam etmektedir) söz edilebilir. Bu durumun bir sonucu olarak, çelik içerisindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu karbürlü bileşiklerin, yapılan borlama ısı işlemi sonucunda parçalanmadığı varsayımına ulaşılmıştır. Ayrıca, bu konuda daha detaylı analiz için (bu varsayımın doğruluğu XRD analizi ile desteklense de (bkz. blm. 4.3)) SEM-WDX analizinin yapılması gereklidir.



#### 4.1.2 XRD Analizi

Borlama ısııl işleminin ardından, incelenen çeliklere XRD analizleri yapılmış ve bor tabakasında oluşmuş olan muhtemel bor bileşikleri araştırılmıştır.

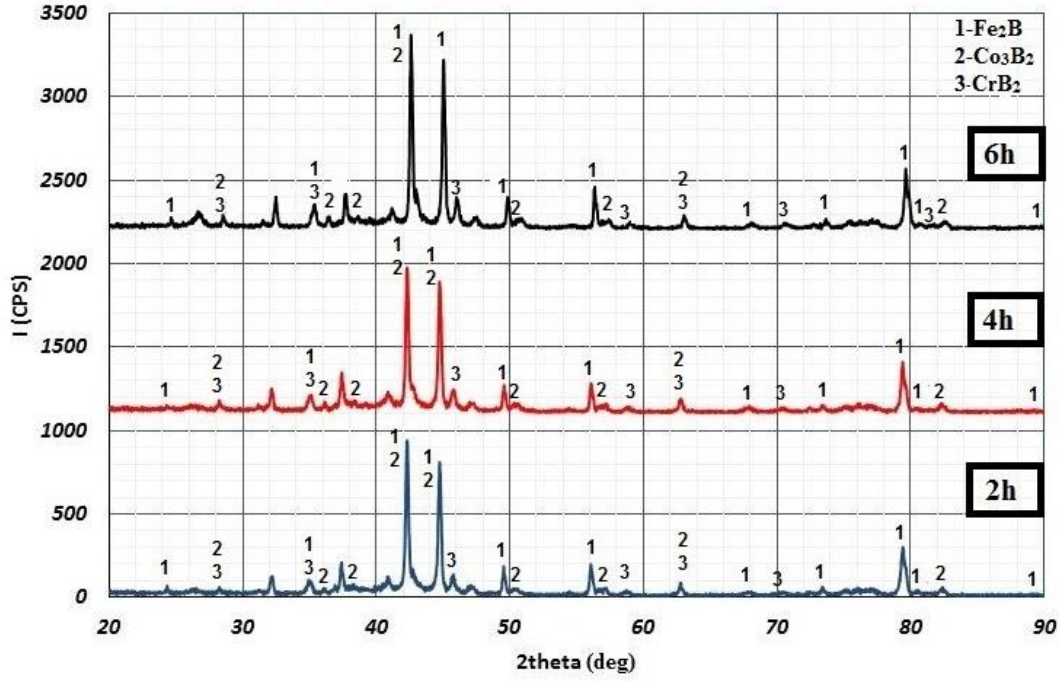
850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin XRD analizinden elde edilen grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.19 850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin XRD grafiği.

Şekil 4.19’deki aynı sıcaklıkta üç farklı borlama süresi için verilmiş olan XRD grafiklerine bakıldığında, bu üç grafiğin aynı piklere sahip olduğu görülmektedir. Bu grafiklerdeki pikler veri kartları (data card) ile analiz edildiğinde, bor tabakasında baskın olarak  $Fe_2B$  ve  $Co_3B_2$  bileşiklerinin yer aldığı görülmüştür.

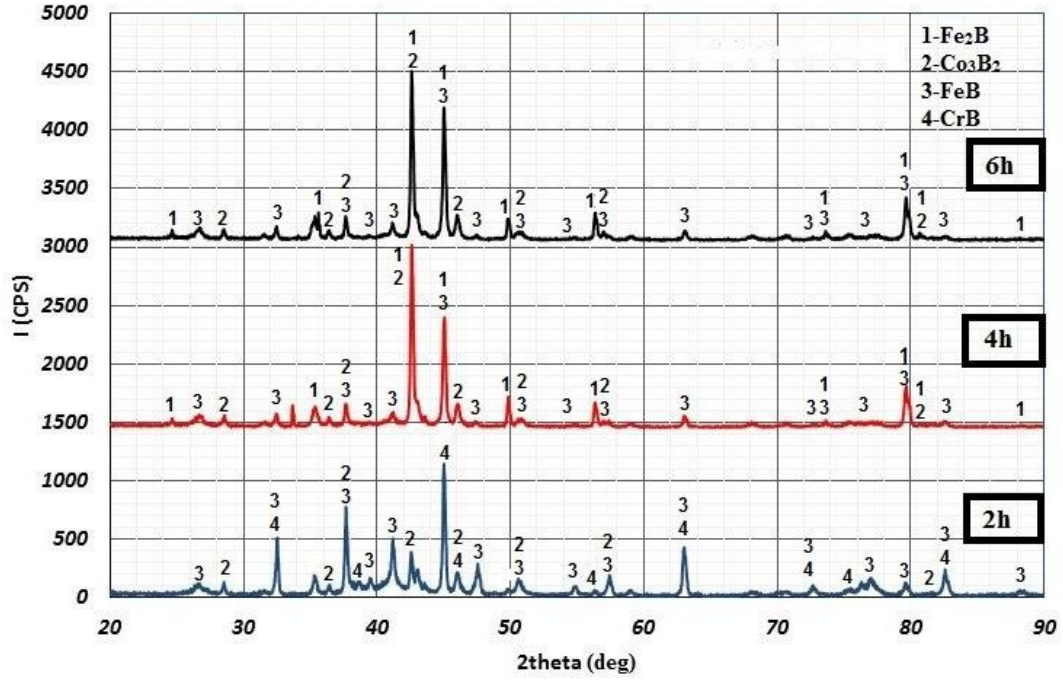
900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin XRD analizinden elde edilen grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.20 900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin XRD grafiği.

Şekil 4.20’den görüldüğü üzere, aynı sıcaklıkta ve üç farklı süreyle borlanmış numunelerde XRD grafikleri aynı piklere sahiptir ve ayrıca tüm süreler için bor tabakasında baskın olarak Fe<sub>2</sub>B, Co<sub>3</sub>B<sub>2</sub> ve CrB<sub>2</sub> bileşikleri yer almaktadır.

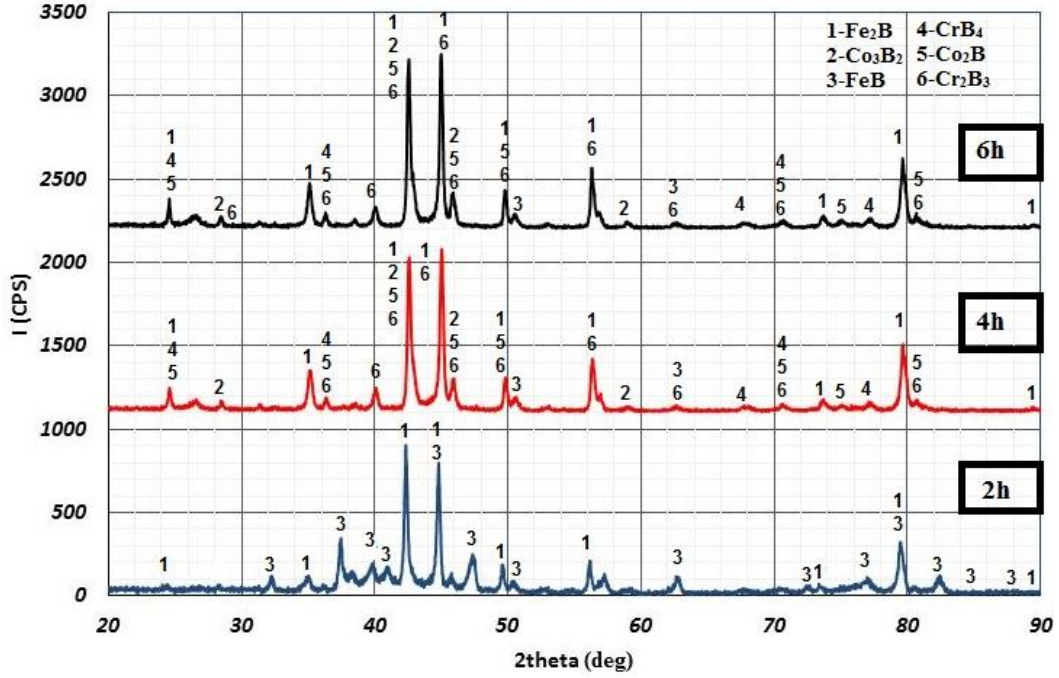
950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin XRD analizinden elde edilen grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.21 950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin XRD grafiği.

Şekil 4.21’den görüldüğü üzere, aynı sıcaklık için tüm borlama süreleri için borlama ısıl işlemi sonucunda bor tabakasında FeB ve  $\text{Co}_3\text{B}_2$  bileşikleri oluşmuştur. Ancak, bu bileşiklerin yanı sıra, 2 saat süreyle borlanmış çelikte CrB, 4 ve 6 saat süre borlanmış numunelerde ise (özellikle difüzyonun etkisiyle)  $\text{Fe}_2\text{B}$  bileşiklerine rastlanmıştır.

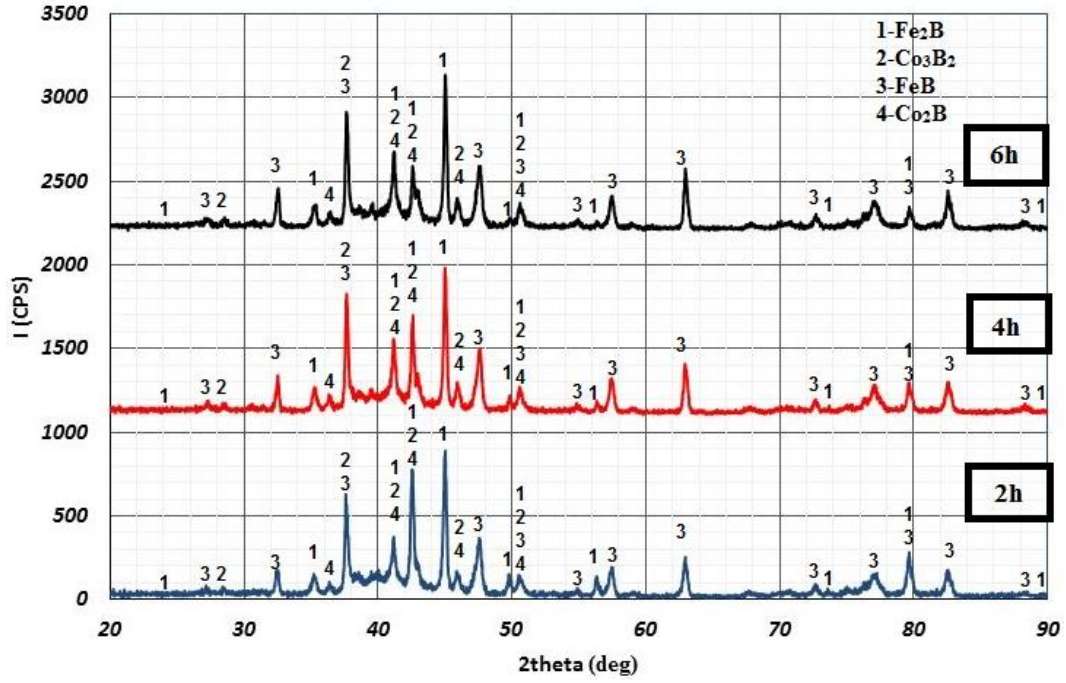
850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin XRD analizinden elde edilen grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.22 850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin XRD grafiği.

Şekil 4.22’den görüldüğü üzere, aynı sıcaklıkta üç farklı borlama süresi için verilen XRD grafiklerindeki pikler veri kartları (data card) ile analiz edildiğinde, bor tabakasında baskın olarak FeB ve Fe<sub>2</sub>B bileşiklerinin yer aldığı görülmüştür. Ayrıca 4 ve 6 süreyle borlanmış numunelerde yapıda Kobalt ve Krom ağırlıklı Bor bileşiklerine de rastlanmıştır. Bunlar Co<sub>3</sub>B<sub>2</sub>, Co<sub>2</sub>B, CrB<sub>4</sub> ve Cr<sub>2</sub>B<sub>3</sub> bileşikleridir.

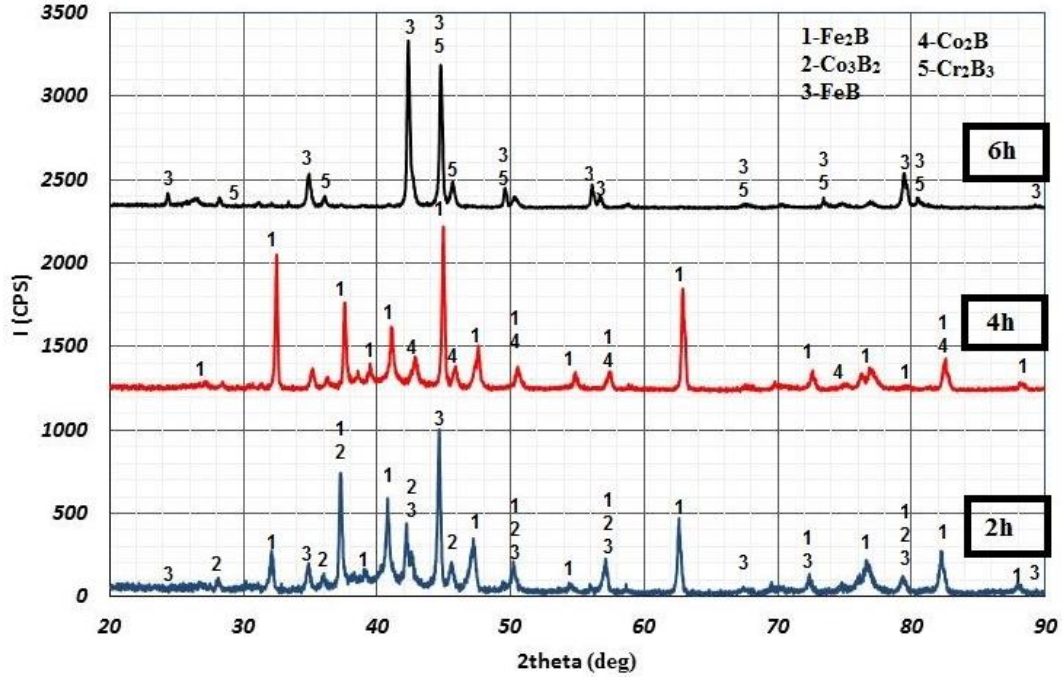
900 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin XRD analizinden elde edilen grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.23 900 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin XRD grafiği.

Şekil 4.23’den görüldüğü üzere, 900 °C’de üç farklı borlama süresi için verilen XRD grafikleri aynı piklere sahiptir. XRD sonucuna göre, tüm numunelerin bor tabakasında FeB, Fe<sub>2</sub>B, Co<sub>3</sub>B<sub>2</sub> ve Co<sub>2</sub>B bileşiklerinin yer aldığı görülmüştür.

950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin XRD analizinden elde edilen grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.



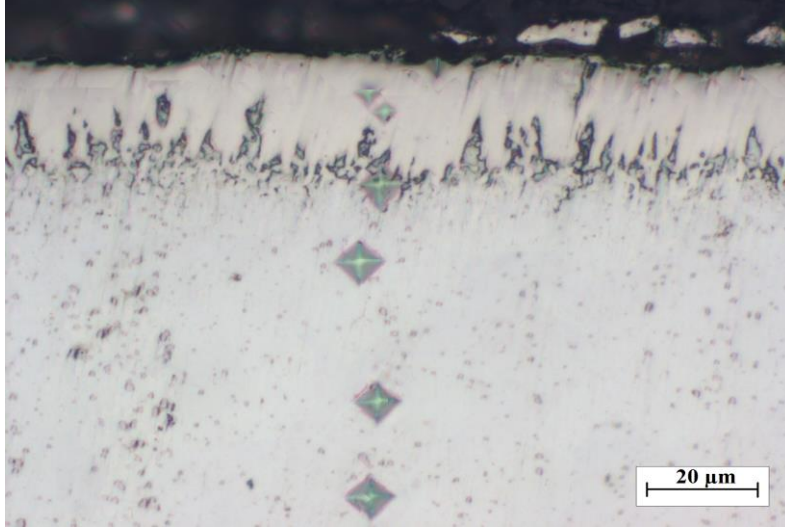
Şekil 4.24 950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin XRD grafiği.

Şekil 4.24’e bakıldığında, 950 °C sıcaklıkta borlanmış numunede tüm süreler için farklı bor bileşiklerin oluştuğu görülmektedir. Bunlar Fe, Cr ve Co’ın bor ile yapmış oldukları bileşiklerdir. Sırasıyla, 2 saat süreyle borlanmış çelikte FeB, Fe<sub>2</sub>B ve Co<sub>3</sub>B<sub>2</sub>, 4 saatte Fe<sub>2</sub>B ve Co<sub>2</sub>B, 6 saatte ise FeB ve Cr<sub>2</sub>B<sub>3</sub> bileşikleri oluşmuştur.

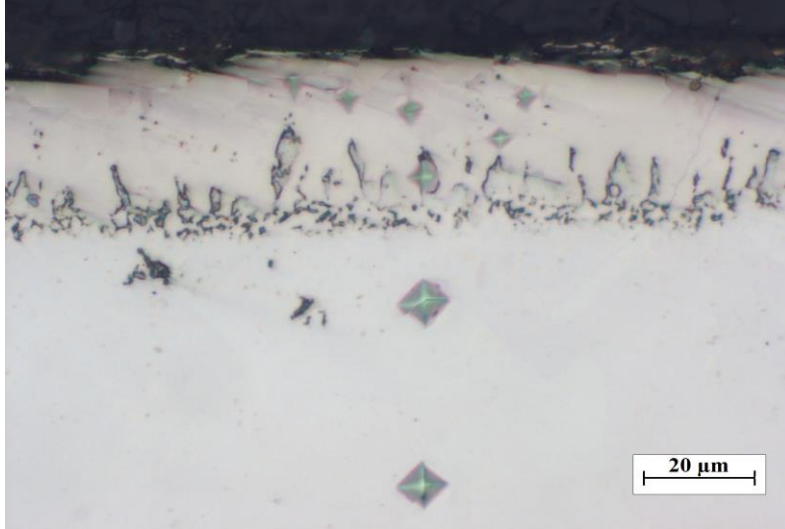
XRD grafikleri birlikte incelendiğinde, AISI M35 çeliğinin bor tabakasında Fe<sub>2</sub>B ve Co<sub>3</sub>B<sub>2</sub> bileşiklerinin baskın olarak, FeB, CrB ve CrB<sub>2</sub> bileşiklerinin ise nadiren, AISI M42 çeliğinin bor tabakasında FeB, Fe<sub>2</sub>B, Co<sub>2</sub>B ve Co<sub>3</sub>B<sub>2</sub> bileşiklerinin baskın olarak, CrB<sub>4</sub> ve Cr<sub>2</sub>B<sub>3</sub> bileşiklerinin ise nadiren yer aldığı görülmüştür. Her iki çelik içinde bor tabakasında oluşan çeşitli bor bileşikleri, bor tabakasının sertliğini etkilemektedir.

### 4.1.3 Mikro Sertlik Analizi

XRD analizinden sonra metalografik olarak hazırlanan numuneler üzerinde mikro sertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik ölçümünün yapıldığı bölge ve indentörün bıraktığı iz (optik mikroskop) (900 °C’de 4 saat süreyle borlanmış çeliğin (her iki çelik içinde) içyapısı üzerinde örnek olarak) aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 4.25** 900 °C’de 4 saat süreyle borlanmış çelik için mikro sertlik indentör izleri (a) AISI M35 ve (b) AISI M42 (örnek).

850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının, yüzeyden matrise doğru ölçülmüş olan, mikro sertlik sonuçları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

**Çizelge 4.2** 850 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin mikro sertlik değerleri.

Çelik	Borlama Isıl İşlemi		Yüzeyden Mesafe µm	Mikro Sertlik HV0,025
	Sıcaklık °C	Süre Saat		
M35	850	2	6	1100
			24	370
			34	392
			72	391
			107	493
			143	426
			4	2,7
		8,54		1400
		25		1105
		48		324
		56		330
		90		400
		125		360
		6	4,6	1100
			5,9	1207
			23	438
			26	457
			63	405
			89	486
			129	478

Çizelge 4.2’den görüldüğü üzere, bor tabakasının yüzeye yakın bölgelerinde sertlik değerleri 1000 HV0,025’in üzerinde iken matrise yaklaştıkça 400 HV0,025’e doğru azalmıştır. 850 °C’de 2 saat süreyle borlanmış numunede sertlikte gerçekleşen nispeten ani düşüşün sebebi, bu işlem için bor tabaka kalınlığının oldukça az olmasındandır. Bor tabaka kalınlığının düşük olması sertlik ölçümlerini zorlaştırmaktadır. Matrisin mikro sertlik değerinin yaklaşık 324 ile 493 arasında değişmesinde ise matriste yer alan metal karbür bileşiklerinin etkisi büyüktür. Aynı şekilde, oluşan bor bileşiklerine bağlı olarak bor tabakasında da farklı sertlik değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda bu sertlik değerleri, muhtemel bor bileşiğine de işaret etmektedir.



900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının, yüzeyden matrise doğru ölçülmüş olan, mikro sertlik sonuçları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

**Çizelge 4.3** 900 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin mikro sertlik değerleri.

Çelik	Borlama Isıl İşlemi		Yüzeyden Mesafe µm	Mikro Sertlik HV0,025
	Sıcaklık °C	Süre Saat		
M35	900	2	4,1	1198
			7,1	911
			25	479
			52	395
			93	372
			127	395
		4	4,1	1912
			6,9	1616
			7,9	1235
			16	893
			37	453
			59	515
		6	92	464
			114	462
			5,4	1538
			7,9	1379
			10,3	1294
			25	636
		6	40	510
			62	439
			78	528
			92	406

Çizelge 4.3’den görüldüğü üzere, bor tabakasının yüzeye yakın bölgelerinde sertlik değerleri 1000 HV0,025’in üzerinde iken matrise yaklaştıkça 400 HV0,025’e doğru azalmıştır. 900 °C’de 2 saat süreyle borlanmış numunede sertlikte gerçekleşen nispeten ani düşüşün sebebi, bu işlem için bor tabaka kalınlığının oldukça az olmasındandır. Bor tabaka kalınlığının düşük olması sertlik ölçümlerini zorlaştırmaktadır. Matrisin mikro sertlik değerinin yaklaşık 372 ile 510 arasında değişmesinde ise matriste yer alan metal karbür bileşiklerinin etkisi büyüktür. Aynı şekilde, oluşan bor bileşiklerine bağlı olarak bor tabakasında da farklı sertlik değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda bu sertlik değerleri, muhtemel bor bileşiğine de işaret etmektedir.

950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin bor tabakasının, yüzeyden matrise doğru ölçülmüş olan, mikro sertlik sonuçları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

**Çizelge 4.4** 950 °C’de borlanmış AISI M35 çeliğinin mikro sertlik değerleri.

Çelik	Borlama Isıl İşlemi		Yüzeyden Mesafe µm	Mikro Sertlik HV0,025
	Sıcaklık	Süre		
	°C	Saat		
M35	950	2	4,16	1200
			16	1192
			17	770
			44	437
			75	363
			119	441
		4	6,7	1076
			11	1353
			20	1705
			25	967
			40	841
			58	472
		6	86	547
			127	406
			4	1600
			5,15	1543
			6,78	1637
			11	1559
		6	12	1545
			19	1473
			23	861
			33	624
			74	490
			124	511

Çizelge 4.4’den görüldüğü üzere, bor tabakasının yüzeye yakın bölgelerinde sertlik değerleri 1000 HV0,025’in üzerinde iken matrise yaklaştıkça 400 HV0,025’e doğru azalmıştır. 950 °C’de 2 saat süreyle borlanmış numunede sertlikte gerçekleşen nispeten ani düşüşün sebebi, bu işlem için bor tabaka kalınlığının oldukça az olmasındandır. Bor tabaka kalınlığının düşük olması sertlik ölçümlerini zorlaştırmaktadır. Matrisin mikro sertlik değerinin yaklaşık 363 ile 541 arasında değişmesinde ise matriste yer alan metal karbür bileşiklerinin etkisi büyüktür. Aynı şekilde, oluşan bor bileşiklerine bağlı olarak bor tabakasında da farklı sertlik değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda bu sertlik değerleri, muhtemel bor bileşiğine de işaret etmektedir.

850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının, yüzeyden matrise doğru ölçülmüş olan, mikro sertlik sonuçları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

**Çizelge 4.5** 850 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin mikro sertlik değerleri.

Çelik	Borlama Isıl İşlemi		Yüzeyden Mesafe µm	Mikro Sertlik HV0,025		
	Sıcaklık	Süre				
	°C	Saat				
M42	850	2	4,5	1017		
			9	640,6		
			11	580		
			15	504		
			25	475		
			43	474		
			50	453		
			100	455		
			4	4,46	1242	
				6,8	1238	
		12		965		
		15		498		
		24		441		
		35		428		
		53		411		
		102		399		
		6		4,3	1394	
				12.1	792	
			43	472		
			49	416		
					105	432

Çizelge 4.5’den görüldüğü üzere, bor tabakasının yüzeye yakın bölgelerinde sertlik değerleri 1000 HV0,025’in üzerinde iken matrise yaklaştıkça 400 HV0,025’e doğru azalmıştır. 850 °C’de 2 saat süreyle borlanmış numunede sertlikte gerçekleşen nispeten ani düşüşün sebebi, bu işlem için bor tabaka kalınlığının oldukça az olmasındandır. Bor tabaka kalınlığının düşük olması sertlik ölçümlerini zorlaştırmaktadır. Matrisin mikro sertlik değerinin yaklaşık 399 ile 580 arasında değişmesinde ise matriste yer alan metal karbür bileşiklerinin etkisi büyüktür. Aynı şekilde, oluşan bor bileşiklerine bağlı olarak bor tabakasında da farklı sertlik değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda bu sertlik değerleri, muhtemel bor bileşiğine de işaret etmektedir.

900 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının, yüzeyden matrise doğru ölçülmüş olan, mikro sertlik sonuçları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

**Çizelge 4.6** 900 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin mikro sertlik değerleri.

Çelik	Borlama Isıl İşlemi		Yüzeyden Mesafe µm	Mikro Sertlik HV0,025
	Sıcaklık	Süre		
	°C	Saat		
M42	900	2	7	811
			10	522
			13	753
			17	741
			29	312
			69	361
		96	391	
		4	6	1572
			8	1523
			10	1252
			14	1353
			27	925
	51		431	
	6	87	452	
		116	441	
		6	1353	
		13	1449	
		18	1429	
		36	1353	
	6	57	551	
		81	470	
		105	408	

Çizelge 4.6’den görüldüğü üzere, bor tabakasının yüzeye yakın bölgelerinde sertlik değerleri 1000 HV0,025’in üzerinde iken matrise yaklaştıkça 400 HV0,025’e doğru azalmıştır. 900 °C’de 2 saat süreyle borlanmış numunede sertlikte gerçekleşen nispeten ani düşüşün sebebi, bu işlem için bor tabaka kalınlığının oldukça az olmasındandır. Bor tabaka kalınlığının düşük olması sertlik ölçümlerini zorlaştırmaktadır. Matrisin mikro sertlik değerinin yaklaşık 312 ile 551 arasında değişmesinde ise matriste yer alan metal karbür bileşiklerinin etkisi büyüktür. Aynı şekilde, oluşan bor bileşiklerine bağlı olarak bor tabakasında da farklı sertlik değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda bu sertlik değerleri, muhtemel bor bileşiğine de işaret etmektedir.

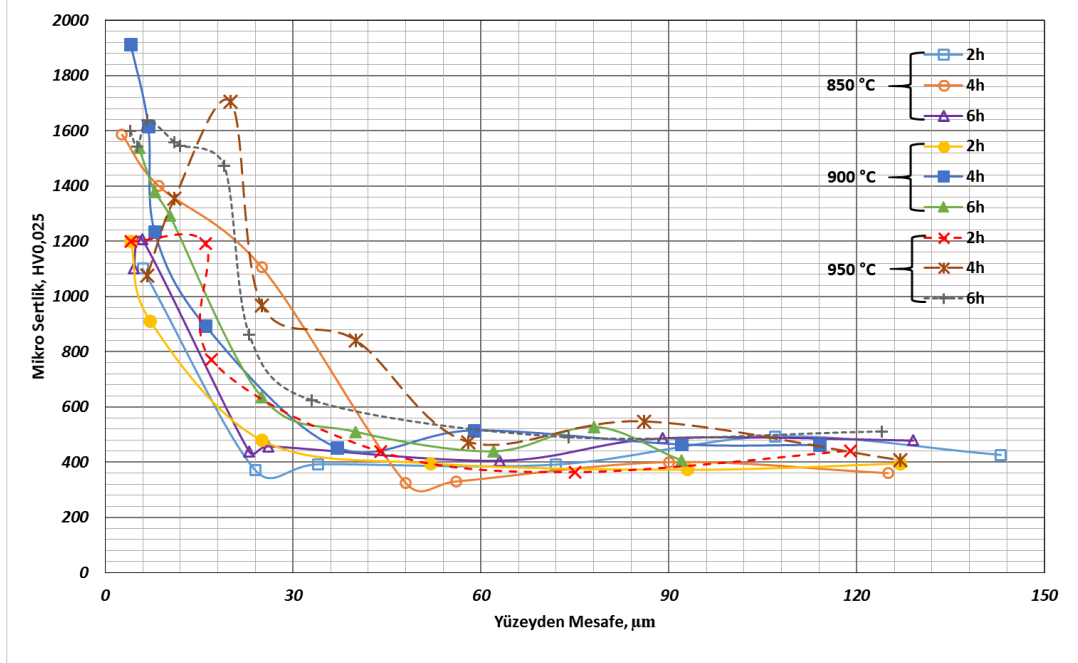
950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin bor tabakasının, yüzeyden matrise doğru ölçülmüş olan, mikro sertlik sonuçları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

**Çizelge 4.7** 950 °C’de borlanmış AISI M42 çeliğinin mikro sertlik değerleri.

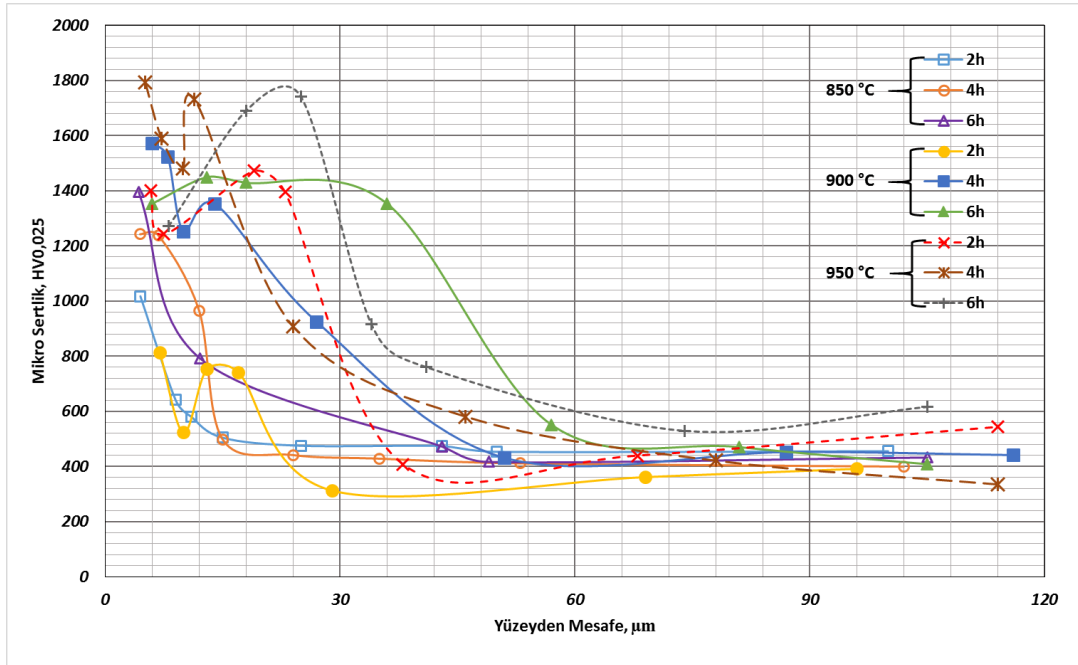
Çelik	Borlama Isıl İşlemi		Yüzeyden Mesafe µm	Mikro Sertlik HV0,025
	Sıcaklık	Süre		
	°C	Saat		
M42	950	2	5,8	1400
			7,5	1242
			19	1472
			23	1394
			38	408
			68	439
		114	543	
		4	5,1	1792
			7,2	1590
			9,9	1480
			11,4	1730
			24	907
	46		581	
	6	78	421	
		114	335	
		8,1	1271	
		18	1690	
		25	1740	
		34	915	
		41	760	
		74	529	
		105	616	

Çizelge 4.7’den görüldüğü üzere, bor tabakasının yüzeye yakın bölgelerinde sertlik değerleri 1000 HV0,025’in üzerinde iken matrise yaklaştıkça 400 HV0,025’e doğru azalmıştır. 950 °C’de 2 saat süreyle borlanmış numunede sertlikte gerçekleşen nispeten ani düşüşün sebebi, bu işlem için bor tabaka kalınlığının oldukça az olmasındandır. Bor tabaka kalınlığının düşük olması sertlik ölçümlerini zorlaştırmaktadır. Matrisin mikro sertlik değerinin yaklaşık 335 ile 581 arasında değişmesinde ise matriste yer alan metal karbür bileşiklerinin etkisi büyüktür. Aynı şekilde, oluşan bor bileşiklerine bağlı olarak bor tabakasında da farklı sertlik değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda bu sertlik değerleri, muhtemel bor bileşiğine de işaret etmektedir.

AISI M35 ve AISI M42 çeliklerinin bor tabakasının, yüzeyden matrise doğru ölçülmüş olan, mikro sertlik sonuçları aşağıdaki grafikte bir arada verilmiştir.



(a)



(b)

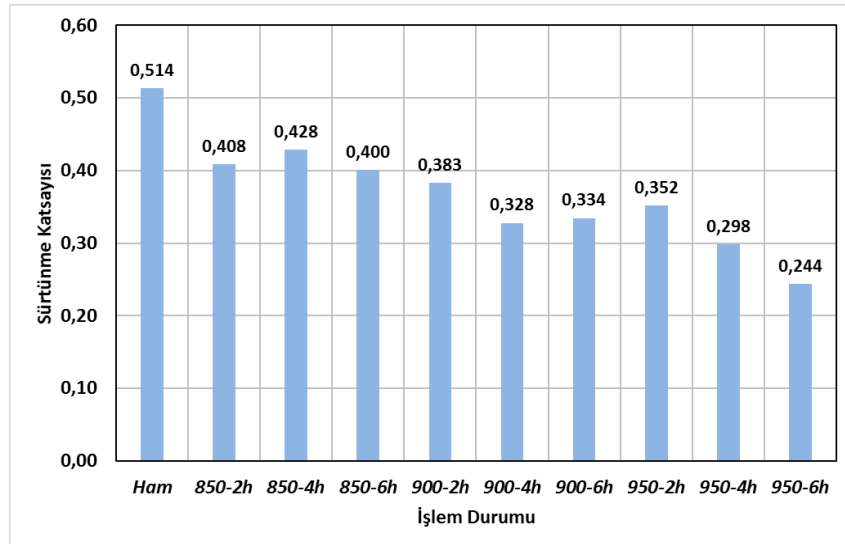
Şekil 4.26 İncelenen çeliklerin bor tabakasının mikro sertlik değişim grafiği (a) AISI M35 ve (b) AISI M42.

Şekil 4.26’da verilmiş olan grafiklerden görüldüğü üzere, incelenen çeliklerin tüm borlama işlemleri için, mikro sertlik değerleri kaplama tabakasının yüzeyinden itibaren matrise doğru git gide azalmaktadır. Ayrıca, kaplama kalınlığı boyunca (yüksek sıcaklık ve sürenin bir etkisi olarak kaplama kalınlığının büyük olduğu numunelerde) mikro sertlik değerlerinin oldukça fazla değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi çeliklerin kimyasal bileşimlerine bağlı olarak bor tabakasında oluşan bor bileşiklerinin farklılığıdır. Literatürde, Fe<sub>2</sub>B bileşiğinin yaklaşık olarak 1600-1800 HV arasında bir sertliğe sahip olduğu verilmiştir. Grafikte bu seviyeler yüzeye yakın bölgelerde gerçekleşmiş ve bu sonuçlar muhtemel Fe<sub>2</sub>B bileşiğine işaret etmektedir. Aynı zamanda bu durum XRD sonuçlarıyla da desteklenmektedir.

## 4.2 Aşınma Testi

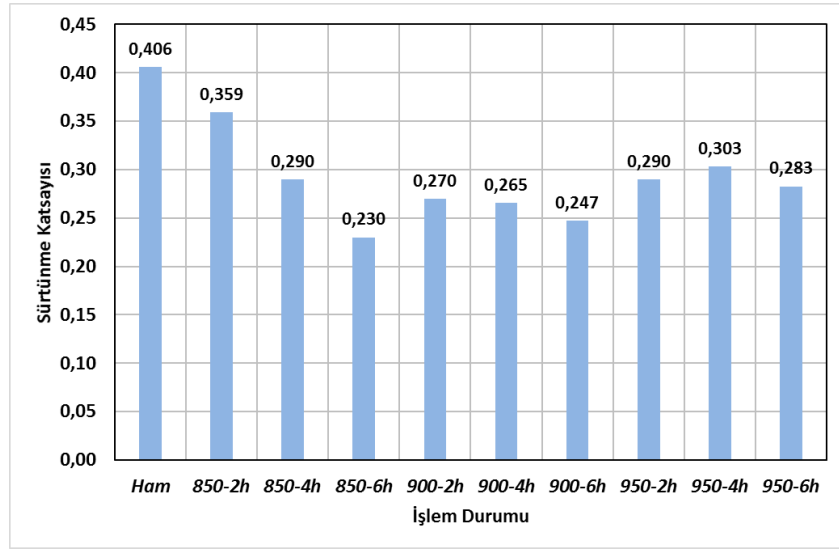
Aşınma deneyinde kullanılan test cihazı, sadece sürtünme katsayısı değerlerini vermektedir. Aşınma hacmi ve aşınma hızı gibi diğer veriler Profilometre cihazı ile saptanmıştır.

İncelenen çeliklerin aşınma test cihazından elde edilen sürtünme katsayıları aşağıdaki grafikte verilmiştir.



(a)

Şekil 4.27 İncelenen çeliklerin sürtünme katsayıları (a) AISI M35 ve (b) AISI M42.



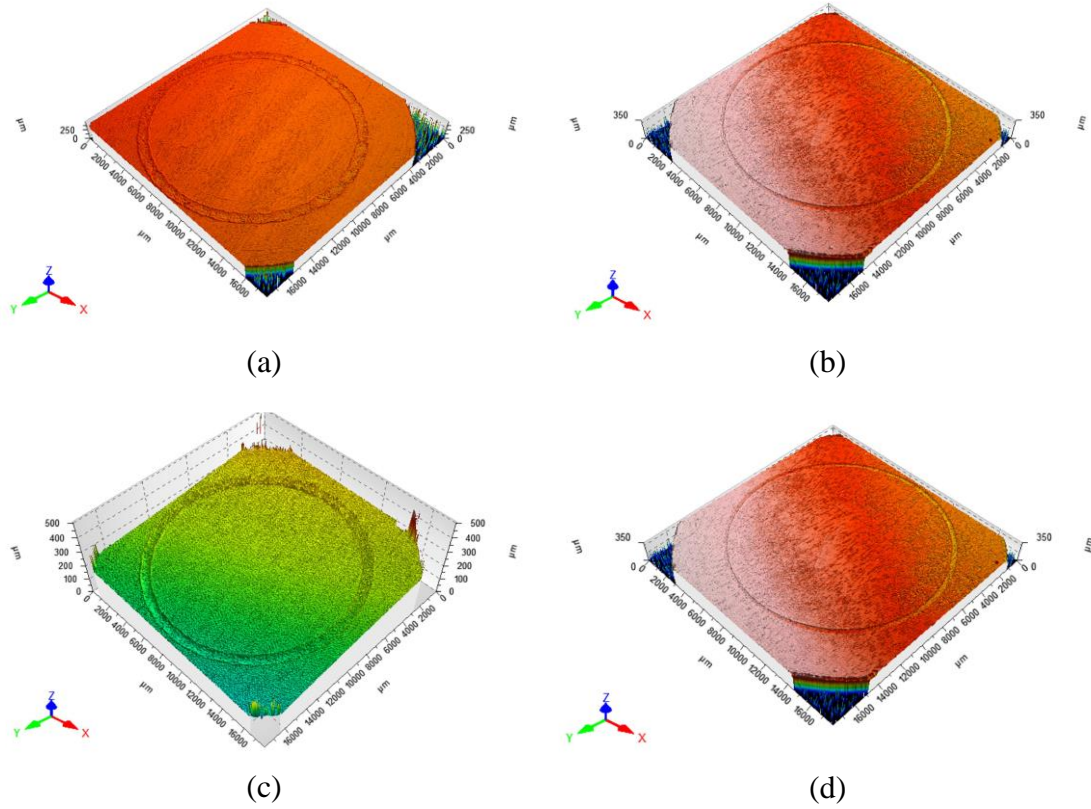
(b)

Şekil 4.27 (Devam) İncelenen çeliklerin sürtünme katsayıları (a) AISI M35 ve (b) AISI M42.

Şekil 4.27'den görüldüğü üzere, her iki çeliğin sürtünme katsayılarında, artan borlama ısı işlem sıcaklığı ve süresiyle paralel olarak, borlama işlemi sonucunda belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Aşınma olayı göz önüne alındığında, sürtünme katsayısının düşük olması aşınan metal miktarını oldukça azaltmaktadır. Bu istenen bir durumdur. Bu durumda sürtünme katsayısının borlama işlemi ile önemli ölçüde iyileştiği görülmektedir. Ayrıca, AISI M42 çeliğinin sürtünme katsayısı her işlem durumu için diğer çelikten daha düşüktür.



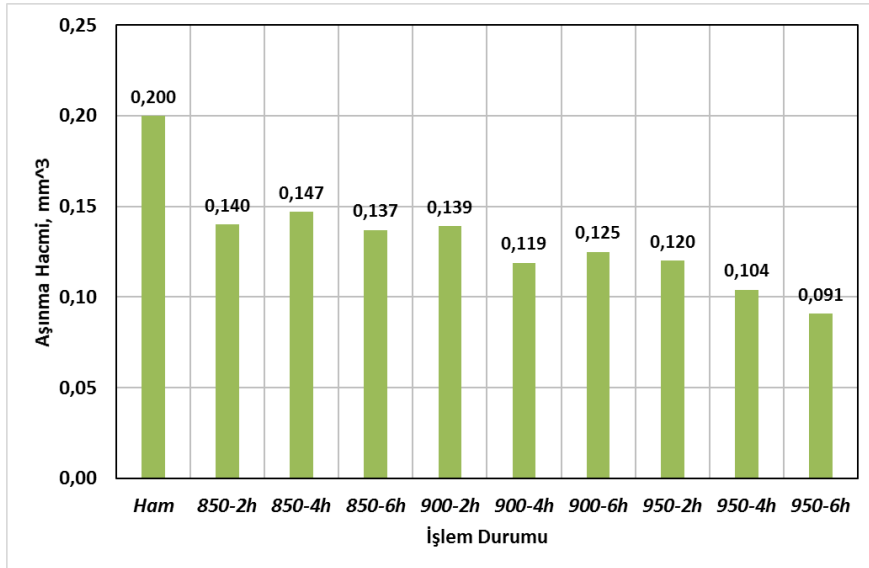
Profilometre cihazında numunelerin yüzeyi komple tarandıktan sonra elde edilen aşınma izi görüntüleri (örnek olarak) aşağıdaki şekilde verilmiştir.



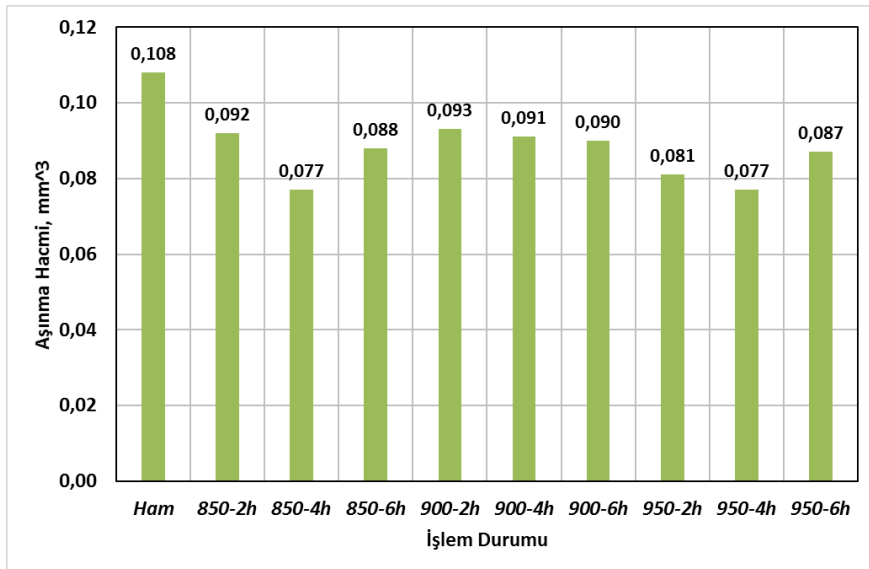
**Şekil 4.28** Profilometre cihazından elde edilen numune yüzeyinin görüntüsü (örnek) AISI M35 (a) Ham, (b) 900-4h ve AISI M42 (c) Ham, (d) 900-4h.

Şekil 4.28'den görüldüğü üzere, her iki çelik içinde borlanmış numunelerde (ham numunelere göre) aşınma izinin boyutlarında belirgin (gözle görünür) bir değişim söz konusudur. Aşındırıcı bilye, ham numunelerde daha geniş bir iz bırakırken, borlanmış numunelerde daha dar bir iz bırakmıştır. Bu görseller aynı zamanda aşınan metal miktarına da işaret etmektedir. Bu durumda, ham numunelerde metal aşınmasının daha yüksek olduğu söylenebilir. Ayrıca, ham numunelerde sürtünme katsayısının daha yüksek oluşu, izlerin görünüşü ile de yakından ilgilidir. Sürtünme katsayısının yüksek olması, aşınan metal miktarının da yüksek olmasına sebep olur. Bu durum, resimlerden de net bir şekilde görülmektedir.

Ancak, aşınan metal miktarının doğru bir şekilde saptanabilmesi için aşınma izinin hacminin ölçülmesi gereklidir. Bunun için Profilometre cihazı kullanılmıştır. İncelenen çeliklerin aşınma izi hacmi (aşınma hacmi, mm<sup>3</sup>) değerleri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.



(a)

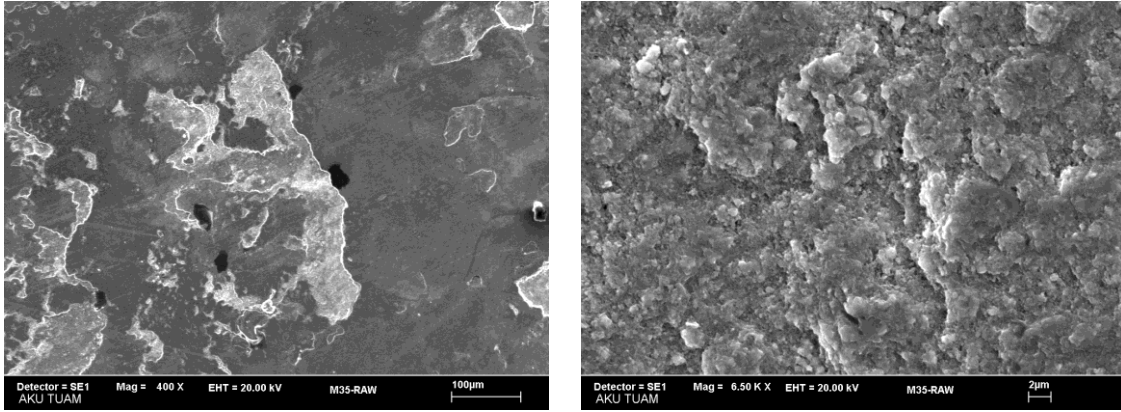


(b)

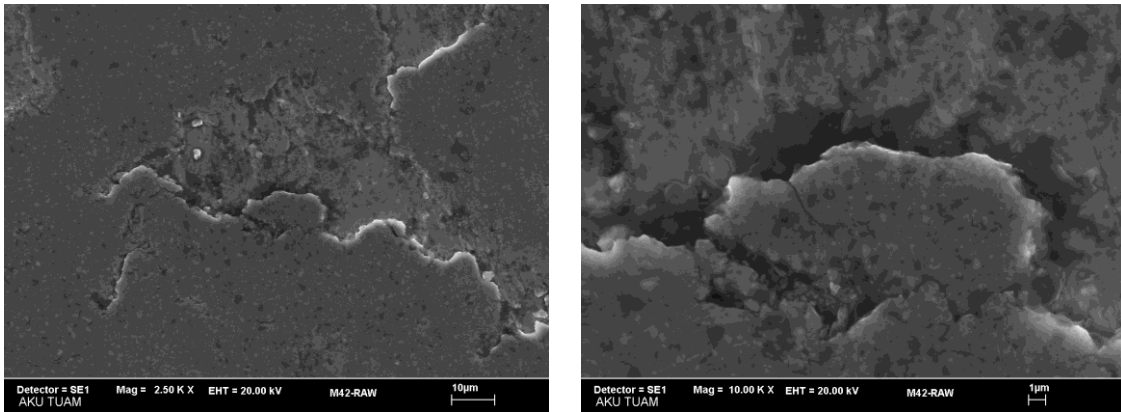
Şekil 4.29 İncelenen çeliklerin aşınma izi hacimleri (a) AISI M35 ve (b) AISI M42.

Aşınma hacmi, aşınan metal miktarını temsil etmektedir. Şekil 4.29'dan görüldüğü üzere, incelenen çeliklere uygulanan borlama işlemi, her iki çelik içinde, aşınan metal miktarını oldukça düşürmüştür. Bu düşüş en fazla AISI M35 çeliğinde gözlenmiştir. Aşınma izi görsellerinin de işaret ettiği gibi (şekil 4.28 - bir üstteki şekil), borlama işlemi hem sürtünme katsayısını hem de aşınan metal miktarını önemli ölçüde iyileştirmiştir.

AISI M35 ve AISI M42 çeliklerinin ham numunelerinin aşınma izlerinin SEM görüntüleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



(a)



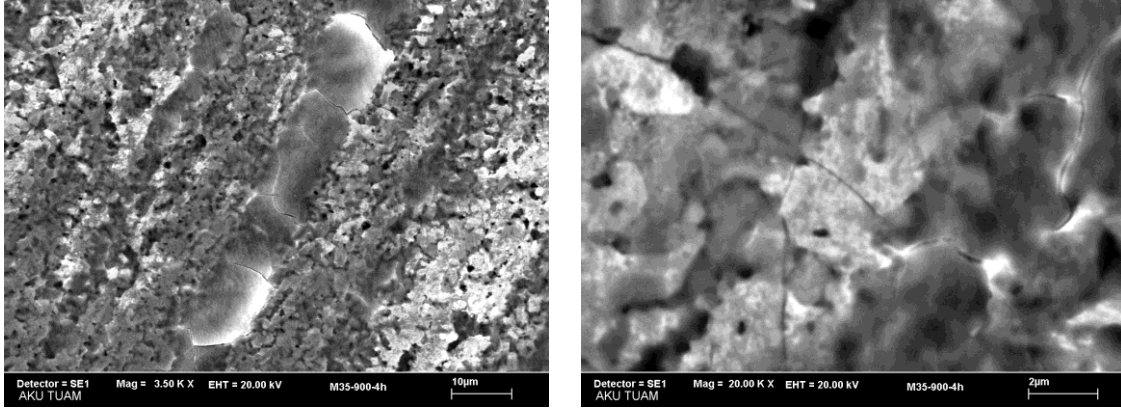
(b)

**Şekil 4.30** Ham numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) AISI M35 ve (b) AISI M42.

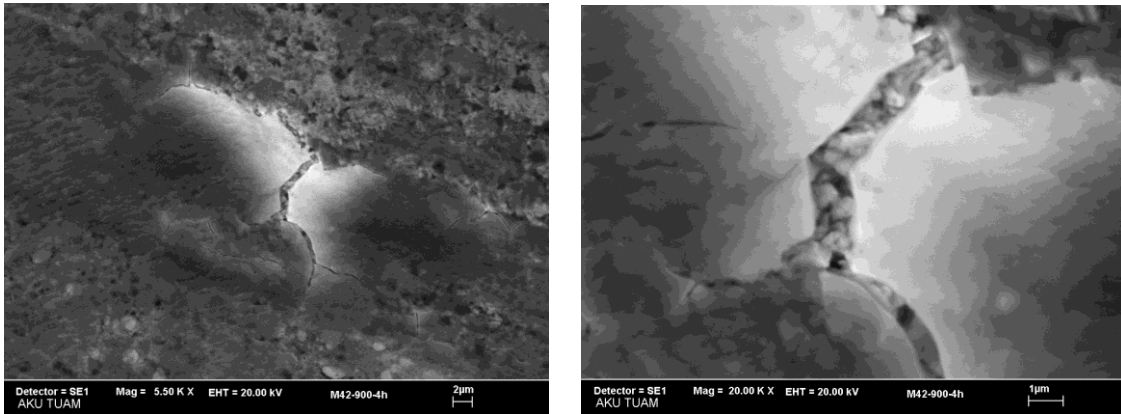
Şekil 4.30'daki ham numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntülerine bakıldığında, her iki çelik içinde, sert karbürlü bileşiklerin kırıldığı görülmektedir. Kırılan bu sert

bileşikler, aşındırıcı bilye ile aşınan yüzey arasında kalmaktadır. Bu durum abrasif aşınmaya işaret etmektedir.

900 °C’de 4 saat süreyle borlanmış AISI M35 ve M42 çeliklerinin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (örnek olarak) aşağıdaki şekilde verilmiştir.



(a)



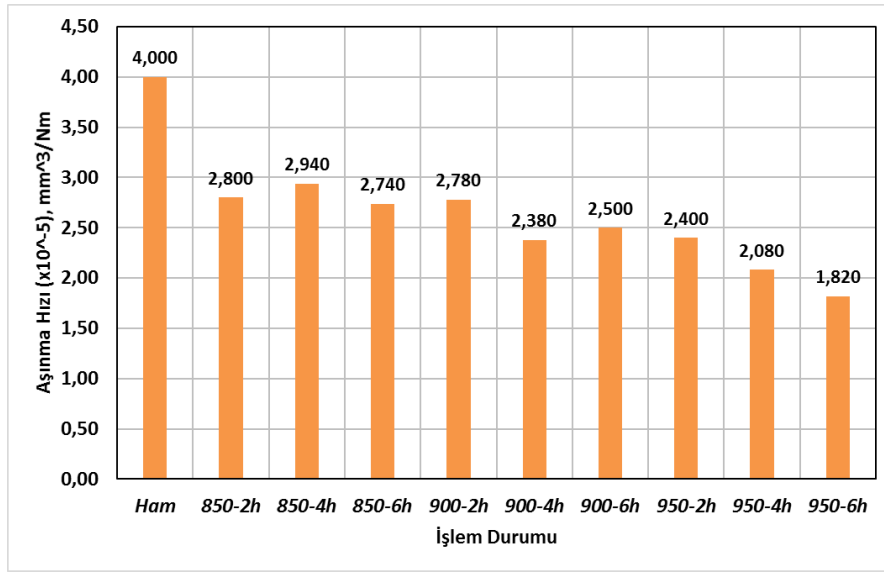
(b)

**Şekil 4.31** 900 °C’de 4 saat süreyle borlanmış çeliklerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) AISI M35 ve (b) AISI M42 (örnek).

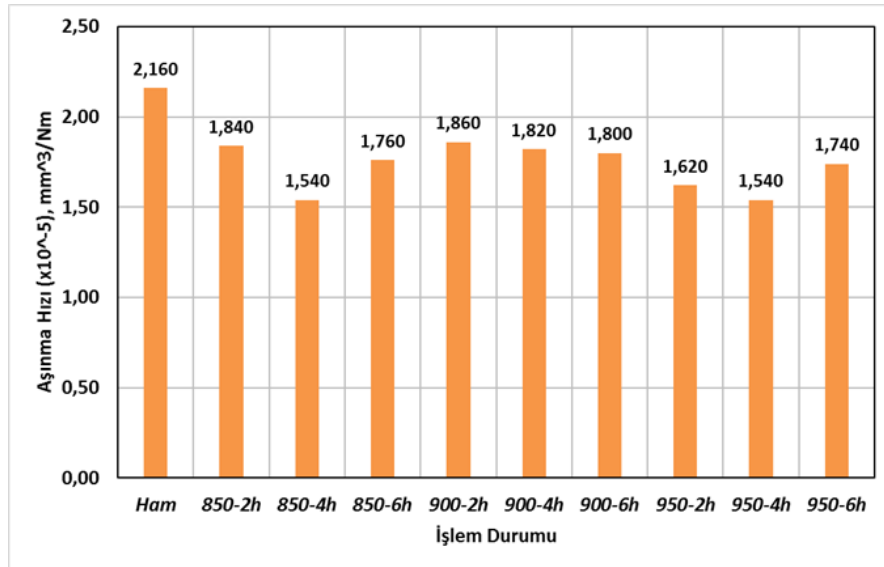
Şekil 4.31’de, borlanmış numunelerin aşınma yüzeylerindeki sert bor bileşiklerinin, aşınma deneyinin bir sonucu olarak, kırılmış olduğu görülmektedir. Kırılarak kopan bu sert bileşikler, ham numunelerde olduğu gibi, aşındırıcı bilye ile aşınan yüzey arasına girmektedir. Bu aşınma türüne abrazif aşınma denmektedir.

Şekil 4.30-4.31'den görüldüğü üzere, incelenen çeliklerin tümünde abrazif aşınma tipinde aşınma olayına rastlanmıştır.

İncelenen çeliklerin, aşınma hacmi değerleri kullanılarak saptanan, aşınma hızı (aşınma hızı = aşınma hacmi / [yük x yol],  $\text{mm}^3 / \text{N} \times \text{m}$ ) değerleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.32 İncelenen çeliklerin aşınma hızı (a) AISI M35 ve (b) AISI M42.

Şekil 4.32'den görüldüğü üzere, incelenen çeliklere uygulanan borlama işleminin bir sonucu olarak (her iki çelik içinde) aşınma hızı azalmıştır. Aşınma hızı, aynı yük altında ve belirli bir sürede aşınan metal miktarını temsil etmektedir. Yani, aşınma hızının azalması, çeliklerin aşınma direncinin artığının bir göstergesidir. Böylece, borlama işlemi sonucunda her iki çeliğin aşınma direnci artmıştır. Bu artış AISI M35 çeliğinde daha belirgindir.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında, yüksek hız takım çeliği olarak kullanılan AISI M35 ve M42 çeliklerine borlama ısıl işlemleri yapılarak, incelenen çeliklerin karakterizasyonu ve aşınma davranışları araştırılmıştır. Yapılan deneyler ve analizler neticesinde elde edilen tüm sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- a) İncelenen çeliklerin optik mikroskop analizlerinde, her iki çeliğinde içyapısında alaşım elementlerinin oluşturduğu metal karbür ( $M_xC$ ) yapılarına (beyaz bölgeler) ve bu metal karbür yapılarının çevresinde ise sementit ağına (siyah bölge) rastlanmıştır. İçyapıdaki metal karbür fazı, bu çeliklerin sertliklerini önemli ölçüde arttırmaktadır.
- b) SEM içyapı analizinde ise, optik mikroskop içyapılarında olduğu gibi, alaşım elementlerinden oluşan metal karbür ( $M_xC$ ) bileşikleri beyaz bölgeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu karbürler, M35 çeliğinde homojen bir dağılım gösterirken, M42 çeliğinde ise daha kaba yapıda ve düzensiz bir dağılım göstermektedir.
- c) Borlanmış AISI M42 çeliği üzerinde gerçekleştirilen bor tabakasının SEM-EDX analizine göre, bor tabakasının gri bölgeleri demir bor bileşiğinden ve beyaz bölgeleri ise molibdenin karbonlu bileşiğinden (beyaz bölgeler matriste devam etmektedir) oluşmaktadır. Böylece, çelik içerisindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu karbürü bileşiklerin, yapılan borlama ısıl işlemi sonucunda parçalanmadığı sunucuna varılmıştır. Benzer durum, AISI M35 çeliği için de geçerlidir.
- d) Bor tabakasının kalınlığı, AISI M35 çeliği için 10-45  $\mu m$  arasında değişirken, AISI M42 çeliği için ise 8-50  $\mu m$  arasında değişmektedir. Dolayısıyla, her iki çelik için, nispeten birbirine yakın bor tabaka kalınlığı elde edilmiştir.
- e) İncelenen çeliklerin bor tabaka kalınlıkları, borlama işleminin bir sonucu olarak, artan süre ve sıcaklıkla birlikte artmaktadır.

- f) XRD grafikleri birlikte incelendiğinde, AISI M35 çeliğinin bor tabakasında  $Fe_2B$  ve  $Co_3B_2$  bileşiklerinin baskın olarak,  $FeB$ ,  $CrB$  ve  $CrB_2$  bileşiklerinin ise nadiren, AISI M42 çeliğinin bor tabakasında  $FeB$ ,  $Fe_2B$ ,  $Co_2B$  ve  $Co_3B_2$  bileşiklerinin baskın olarak,  $CrB_4$  ve  $Cr_2B_3$  bileşiklerinin nadiren yer aldığı görülmüştür. Her iki çelik içinde bor tabakasında oluşan çeşitli bor bileşikleri, bor tabakasının sertliğini etkilemektedir.
- g) Borlama işlemi sonucunda, bor tabakasının yüzeye yakın bölgelerinde, incelenen çelikler için sertlik değerleri 1000 HV<sub>0,025</sub>'in üzerinde iken (maksimum 1792 HV<sub>0,025</sub>) matrise yaklaştıkça 400 HV<sub>0,025</sub>'e doğru azalmıştır. Düşük sıcaklık ve sürelerdeki borlama işlemlerinde bor tabakasının kalınlığı oldukça düşük olduğundan, bu numunelerde sertlikte nispeten ani düşüşler gerçekleşmiştir. Bor tabaka kalınlığının düşük olması sertlik ölçümlerini zorlaştırmaktadır.
- h) Matrisin mikro sertlik değerinin yaklaşık 324 ile 493 arasında değişmesinde ise matriste yer alan metal karbür bileşiklerinin etkisi büyüktür. Benzer şekilde bor tabakasında da oluşan bor bileşiklerine bağlı olarak değişik sertlik değerleri elde edilmiştir.
- i) İncelenen çeliklerin tümünde mikro sertlik değerleri, kaplama tabakasının yüzeyinden itibaren matrise doğru git gide azalmaktadır. Ayrıca, kaplama kalınlığı boyunca numunelerin mikro sertlik değerlerinin (kaplama kalınlığının büyük olduğu numunelerde) değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi, çeliklerin kimyasal bileşimlerine bağlı olarak, bor tabakasında oluşan bor bileşiklerinin farklılığıdır.
- j) Yapılan aşınma deneyi sonuçları analiz edildiğinde, incelenen çeliklerin sürtünme katsayılarında, artan borlama ısı işlem sıcaklığı ve süresiyle paralel olarak, belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Ayrıca, M42 çeliğinin sürtünme katsayısı her işlem durumu için diğer çelikten daha düşüktür.



- k) Her iki çelik içinde, aşınma deneyinde kullanılan aşındırıcı bilye, ham numunelerde daha geniş bir iz bırakırken, borlanmış numunelerde daha dar bir iz bırakmıştır. Ayrıca, ham numunelerde sürtünme katsayısının daha yüksek oluşu, izlerin görünüşü ile de yakından ilgilidir.
- l) Aşınma hacmi, aşınan metal miktarını temsil etmektedir. İncelenen çeliklere uygulanan borlama işlemi, her iki çelik içinde, aşınan metal miktarını oldukça düşürmüştür. Bu düşüş en fazla AISI M35 çeliğinde gözlenmiştir. Dolayısıyla, borlama işlemi hem sürtünme katsayısını hem de aşınan metal miktarını önemli ölçüde iyileştirmiştir.
- m) Ham ve borlanmış numunelerin aşınma yüzeylerine bakıldığında, her iki çelik için de, hem sert karburlü bileşiklerin kırıldığı (ham numunelerde) hem de sert bor bileşiklerinin kırıldığı (borlanmış numunelerde) görülmektedir. Dolayısıyla, incelenen çeliklerin tümünde (tüm durumlar için) görülen aşınma türü, abrazif aşınmadır.
- n) İncelenen çeliklere uygulanan borlama işleminin bir sonucu olarak (her iki çelik içinde) aşınma hızı azalmıştır. Aşınma hızı, aynı yük altında ve belirli bir sürede aşınan metal miktarını temsil etmektedir. Yani, aşınma hızının azalması, çeliklerin aşınma direncinin artığının bir göstergesidir. Böylece, borlama işlemi sonucunda her iki çeliğin aşınma direnci artmıştır. Bu artış AISI M35 çeliğinde daha belirgindir.

Sonuçta, incelenen çeliklere uygulanan borlama ısıl işlemi, çeliklerin yüzey sertliğini ve aşınma direncini arttırmıştır.

## 6. KAYNAKLAR

- Amiri, M. and Khonsari, M. (2010). On the thermodynamics of friction and wear. *Entropy*, **12(5)**:1021-1049.
- Asthana, P., Liang, H., Usta M. and Ucisik, A.H. (2006). Wear and Surface Characterization of Boronized Pure Iron. *Journal of Tribology*, **129(1)**:1-1.
- Axén, N. H. S. and Jacobson, S. (2001). Modern Tribology Handbook, Friction and Wear Measurement Techniques. Crc Press, London.
- Aytekin, H. and Akçin Y. (2013). Characterization of borided Incoloy 825 alloy. *Materials and Design*, **50**:515–521.
- Bataev, I.A., Bataev, A.A., Golkovsky, M.G., Teplykh, A.Y., Burov, V.G., Veselov, S.V. (2012). Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel. *Surface & Coatings Technology*, **207**:245–253.
- Bayer, A. M., and Becherer, Bruce A., Vasco, T. (1995). High-Speed Tool Steels, ASM Metal Handbook Vol 16. ASM International, USA, 51-59.
- Bayer, R. G. (2002). Tribology Consultant, Fundamentals of Wear Failure, ASM Handbook Volume 11. ASM International, USA, 901-905.
- Bejar, M.A., Moreno, E., Mater, J. (2006). Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy Steel. *J. Mater. Process. Technol.* **173**:352.
- Bhushan, B. (2013). Principles and Applications of Tribology, A John Wiley & Sons Ltd. Publication, USA.
- Bindal, C. ve Ucisik, A.H. (2008). Characterization of boriding of 0.3% C, 0.02% P plain carbon steel. *Vacuum*, **82**:90-94.
- Bor Raporu, 2003. TMMOB Metalurji mühendisleri odası, Temmuz, Türkiye.
- Campos-Silva, I., Farah, M., López, N., Bermúdez, G., Rodríguez, G., Villa-Velázquez C. (2008). Evaluation of the tool life and fracture toughness of cutting tools boronized by the paste boriding process. *Appl. Surf. Sci.*, **254**:2967-2974.
- Campos-Silva, I., Doñu-Ruíz, M., Martínez-Trinidad, J., Rodríguez-Castro, G., Hernández-Sánchez, E. and Bravo-Bárceñas, O. (2011c). Interfacial indentation

- test of FeB/Fe<sub>2</sub>B coatings. *Surface and Coatings Technology*, **206**:1809–1815.
- Campos-Silva, I., Ortiz-Dominguez, M., Keddani, M., López-Perrusquia, N., Carmona-Vargas, A. and Elias-Espinosa, M. (2009). Kinetics of the formation of Fe<sub>2</sub>B layers in gray cast iron: effects of boron concentration and boride incubation time. *Appl. Surf. Sci.*, **255**:9290–9295.
- Campos-Silva, E. and Rodríguez-Castro, G.A. (2015). Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. *Thermochemical Surface Engineering of Steels: Improving Materials Performance*, Woodhead Publishing.
- Carbucicchio, M., Zecchi, E., Palombarini, G. and Sambogna, G. (1983). Phase composition and structure of boride layers grown on laboratory-cast low-chromium alloys. *Journal of Materials Science*, **18**:3355–3362.
- Chatterjee-Fischer, R. (1989). Boriding and diffusion metallizing. *Surface modification technologies*, 567-609.
- Chatterjee-Fischer, R. (1986). Time to take a look at multicomponent boriding. *Metal Prog.*, **129(5)**:24-37.
- Cooper, C.V. and Peterson G.G. (1990). The microstructure and microchemistry of a thermal diffusion-boronized Co–Cr–W–C alloy. *Surf. Coat. Technol.*, **43–44**:756–67.
- Czerwinski, F. (2012). Heat treatment conventional and novel applications. *Thermochemical Treatment of Metals*, **5**:73-75.
- Czichos, H. (1978). *Tribology; A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*. Elsevier, Amsterdam.
- Çalık, A. (2002). Türkiye'nin bor madenleri ve özellikleri. *Mühendis ve Makine*, **43**:37-41.
- Çeçen, D. (1968). Bor cevherleri ve borun çağımız ve gelecekteki önemi. *Madencilik*, **8**:10-18.
- Davis, J. (1997). Ion Implantation Boriding of Alpha–Iron and M2 Steel. Thesis, Department of mechanical engineering, Colorado State University, USA.
- Davis, J. R. (2002). *Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics*, ASM

Metal Handbook. ASM International USA 218-220.

- Delaplane, R.G., Dahlborg, U., Howells, W., Lundstrom, T., (1988). A neutron diffraction study of amorphous boron using a pulsed source. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **106**:66-67.
- Dukarevich, I.S., Mozharov, M.V. and Shigarev A.S. (1973). Redistribution of elements in boride coatings. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, **2**:64–66.
- Duman, İ. (2004). Bor I. Ulusal Metalurji ve Malzeme günleri. Bildiriler Kitabı OGÜ, Eskişehir.
- Duman, T. (2003). Bor Madenleri ve Stratejik Bor Ürünleri. *Bilim ve Ütopya Dergisi*, **114**:18-21.
- European Commission (EC), (2014). Edited by Achilleas Stalios, Rapporteurs: Victoria Folea and Edmond Cahill, Metallurgy made in and for Europe, The Perspective of Producers and End-Users Roadmap. Research and Innovation, Luxemburg.
- Fellner, P. and Chrenkova, M. (1991). Rate of Growth of Boride Layers on Highly Alloyed Steel. *Chemical Papers*, **46**:221-231.
- Fiedler, H.C. and Sieraksi, R.J. (1971). *Metal Prog.*, **99**:101-107
- Galvanetto, E., Borgioli, F., Bacci, T., Pradelli, G. (2006). Wear behavior of iron boride coatings produced by VPS technique on carbon steels. *Wear* **260**:825-831.
- Garrett, Donald E. (1998). Borates: Handbook of Deposits, Processing, Properties, and Use. Academic Press, San Diego, USA.
- Gay Lussac, J.L. and Thenard, L.J. (1808). Sur la décomposition et la recomposition de l'acide boracique. *Annales de chimie* **68**: 169–174.
- Goeuriot, P., Thevenot, F., Driver, J.H. and Laurent, A. (1981). *Trait. Therm.*, **152**:21-28.
- Hegewaldt, F., Singheaser, L. and Turk, M. (1984). Gas Boriding. *Härt.-Tech. Mitt.*, **39(1)**:7-15
- Hildebrand, G.H. (1982). Borax Pioneer: Francis Marion Smith. San Diego, Howell-North Books, USA, 267.

- Hosokawa, K., Yamashita, T., Veda M. and Seki T. (1972). Kinzoku Hyomen Gitjutsu, Translation RTS 7945 **23(4)**:211-216.
- Jain, V. and Sundararajan, G. (2002). Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel. *Surface and Coatings Technology*, **149**:21–26.
- Japanese Industrial Standard (JIS), Method of Wear Resistance Test For Metallic Coatings, University of Washington 2007, USA.
- Jiang, J., Wang Y., Zhong, Q., Zhou, Q. and Zhang, L. (2011). Preparation of Fe<sub>2</sub>B boride coating on low-carbon steel surfaces and its evaluation of hardness and corrosion resistance. *Surface and Coatings Technology*, **206**:473-478.
- Kato, K. and Adachi, K. (2001). Wear Mechanisms. Tohoku University, CRC Press, London.
- Kayalı, Y., Yalçın, Y., Taktak, Ş. (2011). Adhesion and wear properties of borotempered ductile iron. *Materials and Design*, **32**:4295-4303.
- Kennedy, D.M. and Hashmi, M.S.J. (1998). Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials. *Material Processing Technology*, **77**:246-253.
- Kulka, M., Pertek, A., Klimek, L. (2006). The influence of carbon content in the borided Fe-alloys on the microstructure of iron borides. *Materials Characterization*, **56**:232-240.
- Kuper, A., Qian, X., Stock, H.R., Mayr, P. (2000). A novel approach to gas boronizing. *Surface and Coatings Technology*, **130**:87-93.
- Lou, D.C., Solberg, J.K., Akselsen, O.M., Dahl, N. (2009). Microstructure, property investigation of paste boronized pure nickel, Nimonic 90 super alloy. *Mater. Chem. Phys.*, **115**:239–44.
- Lyday, P.A. (1996). Boron, US Department of the Interior, Bureau of Mines, Geological Survey Minerals Yearbook. Washington, USA.
- Martin, J.E. (2008). Physics for Radiation Protection: A Handbook. 2nd Edition, Completely Revised and Enlarged, Wiley-VCH, Germany.
- Mittemeijer, E.J. (2010). Fundamentals of Materials Science: The Microstructure–

Property Relationship Using Metals as Model Systems. Springer Science & Business Media, Germany.

Morimoto, J., Ozaki, T., Kubohori, T., Morimoto, S., Abe, N., Tsukamoto, M. (2009). Some properties of boronized layers on steels with direct diode laser. *Vacuum*, **80**:185.

Mu, D., Shen, B., Zhao, X. (2010). Effects of boronizing on mechanical and dry-sliding wear properties of CoCrMo alloy. *Materials and Design*, **31**:3933–3936.

Muhammad, W. (2013). Boriding of high carbon high chromium cold work tool steel. Institute of Industrial Control Systems, International Symposium on Advanced Materials, Pakistan.

Oğuz, B. (1993). Aşınma Sorunları ve Kaynak Dolguları. Oerlikon Yayını, İstanbul.

Ohji, T., Colombo, P., Naito, M., Garay, E. and Lin, H.T. (2013). Innovative Processing and Manufacturing of Advanced Ceramics and Composites II. Wiley, USA.

Orning, H. and Schaaber, O. (1962). Translation BISI 3953. *Härt.-Tech. Mitt*, **17(3)**:131-140.

Önal, G. ve Burat, F. (2008). Boron mining and processing in Turkey. *Gosdaparka Surowcami Minaralynmi*, **24**:50-59.

Özbek, İ. (2014). Mechanical Properties and Kinetics of Borided AISI M50 Bearing Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **39**:5185.

Özbek, İ. and Bindal, C. (2011). Kinetics of borided AISI M2 high speed steel. *Vacuum*, **86**:391-397.

Petrova, S., Suwattananont, N., Pallegar, K., Vangaveti, R. (2011). Boron coating to combat corrosion and oxidation. *Corrosion Reviews*, **25**:550-570.

Rile, M. (1974). Reasons for the formation of cracks in boride coating on steel. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, **10**:20–23.

Roskill, L. (1999). The Economics of Boron. Roskill Information Services Ltd, London England.

Sahin, S. (2009). Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714. *Journal of Materials Processing*

*Technology*, **209**:1736-1741.

- Samadi, V. and Habibolahzade, A. (2010). Evaluation of microstructures and wear properties of duplex boride coatings. *Materials Science and Technology*, **26(1)**:41-46.
- Sarız, K. ve Nuhoglu, İ. (1992). Endüstriyel Hammadde Yatakları Ve Madenciliği. Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, Eskişehir, Türkiye.
- Sinha, A.K. (1991). Boriding (boronizing) of Steels. Heat Treating, Vol. 4., Ohio: ASM Handbook, ASM International, USA, 437-447.
- Smith, E.H. (1998). Mechanical Engineer's Reference Book. Butterworth Heinmann, Oxford England.
- Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W. (2013). Friction-Induced Vibrations and Self-Organization: Mechanics and Non Equilibrium Thermodynamics of Sliding. Engineering Tribology, Butterworth Heinman, UK, 1-73.
- Stefanov, S., Batschwarow, S., (1988). Ceramic Glazes, Bauver lag GmbH, Berlin.
- Stokes, J. (2008). The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process. Dublin City University, Dublin.
- Tabur, M., İzciler, M., Gül, F., Karacan, I. (2009). Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel. *Wear*, **266**:1106-1112.
- Taşçı, A. (1993). Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları. İstanbul Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.
- Taşçıoğlu, S. (1992). Bor ve Silisyum Kimyası. Marmara Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- Thangaraj, B.K., Ravichandran, S.P., Min Ho, L. (2013). Pack boronizing of AISI H11 tool steel: Role of surface mechanical attrition treatment. *Vacuum*, **97**:36-43.
- Tikekar, N.A. (2007). Novel Double-layer Titanium Boride Coating on CP-Titanium and Titanium-Aluminum-Vanadium Alloy: Kinetics of Boron Diffusion and Coating Morphologies. Doktora Tezi, The University of Utah, Utah, USA.
- Torun, O., Çelikyürek I. (2009). Boriding of diffusion bonded joints of pure nickel to

commercially pure titanium. *Material and Design*, **30**:1830–1834.

Tylczak, J.H. and Oregon, A. (1992). Friction, Lubrication and Wear Technology. ASM Metal Handbook Volume 18, ASM International, USA, 640-655.

U.S. Geological Survey (USGC), (2014). Robert D. Crangle, Jr., U.S. Department of the Interior, Mineral Commodity Summaries. U.S. Government Printing Office, February:33-34.

Ulrich, B. (1985). Boron and Boron Alloys. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Volume A4, Germany.

Vogel, W. (1994). Glass Chemistry. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, 2nd Revised, Germany.

Wick, C. (1987). HSS Cutting Tools Gain a Productivity Edge. Manufacturing Engineering, USA.

Zimmerman, C. (2013). Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. ASM Handbook, Vol 4A, ASM International, USA, 709 – 724.

### **İnternet Kaynakları**

- 1- <http://www.diffusion-alloys.com/downloads/DAL-Boronising.pdf>, 06.02.2015
- 2- [http://www.wallworkht.co.uk/content/nitride\\_and\\_nitrocarburise](http://www.wallworkht.co.uk/content/nitride_and_nitrocarburise), 03.02.2015
- 3- <http://van.physics.illinois.edu/qa/listing.php?id=17594>, 05.04.2015
- 4- <http://www.ciaaw.org/atomic-weights.html>, 03.03.2015
- 5- <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi>, 03.04.2015
- 6- <http://en.wikipedia.org/wiki/Boron>, 02.01.2015
- 7- <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/boron/>, 02.02.2015
- 8- <http://www.rsc.org/periodic-table/element/5/boron>, 02.01.2015
- 9- <http://www.etimaden.gov.tr/bor-turkiye-tarihcesi-74s.htm>, 02.01.2015
- 10- [http://www.resourcesandenergy.nsw.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0004/237802/Boron.pdf](http://www.resourcesandenergy.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0004/237802/Boron.pdf), 02.01.2015



- 11- [http://www.rareearth.org/boron\\_properties.htm](http://www.rareearth.org/boron_properties.htm), 03.01.2015
- 12- [http://chemwiki.ucdavis.edu/Inorganic\\_Chemistry/Descriptive\\_Chemistry/Main\\_Group\\_Reactions/Reactions\\_of\\_Main\\_Group\\_Elements\\_with\\_Oxygen](http://chemwiki.ucdavis.edu/Inorganic_Chemistry/Descriptive_Chemistry/Main_Group_Reactions/Reactions_of_Main_Group_Elements_with_Oxygen),  
03.01.2015
- 13- <http://www.alper.com.tr/hizmetler/isil-islem/borlama.html>, 03.04.2015
- 14- <http://www.mobermetal.com/index-12.htm>, 03.04.2015
- 15- <https://www.erasteel.com/content/conventional-high-speed-steel>, 03.04.2015
- 16- [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms\\_of\\_wear](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear),  
03.03.2015
- 17- <http://metalurji.kocaeli.edu.tr/files/DUY-073.pdf>, 03.02.2015
- 18- [http://www.cetr.com/ASTM\\_Standard/ASTM F732-82 Recip Pin on Flat Joint  
Prostheses.htm](http://www.cetr.com/ASTM_Standard/ASTM_F732-82_Recip_Pin_on_Flat_Joint_Prostheses.htm) 05.04.2015
- 19- [http://emrtk.uni-  
miskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz\\_anyagtech/1\\_konzultacio\\_ele  
mei/case\\_study.htm](http://emrtk.unimiskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/1_konzultacio_elemei/case_study.htm), 05.04.2015

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet KÜÇÜKKURT  
Doğum Yeri ve Tarihi : Çay, 07.01.1986  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : mehmetkucukurt86@gmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Elmadağ YDA Lisesi, 2004  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi,  
Metal Öğretmenliği, 2010  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (Devam ediyor)